



DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO

Especialización, Maestría y Doctorado en Diseño

**“CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN SISTEMA
CONSTRUCTIVO DE TIERRA CRUDA APLICADO EN PROTOTIPOS “CASO DE
ESTUDIO, LOCALIDAD: AQUIXTLA, PUEBLA”**

Gabriel Morales Galaviz

Tesis para optar al grado de Maestro en diseño

Línea de Investigación: Arquitectura Bioclimática

Miembros del jurado:

Dr. José Roberto García Chávez.

Director de la tesis

Dr. Luis Fernando Guerrero Baca

Arq. Alejandra Caballero Cervantes

Dr. Ricardo Aguayo González

Dr. Jorge Sánchez de Antuñano

México D.F.

Mayo 2017

DEDICATORIAS

A mis padres por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Roberto García Chávez, por su apoyo y tiempo.

A mi familia por su confianza y apoyo.

A mis compañeros.

RESUMEN

El siguiente trabajo es el resumen de la investigación referente a un experimento que se realizó como caracterización de dos sistemas constructivos distintos aplicados en muros, con la finalidad de determinar las características térmicas de ambos y así obtener resultados que nos ayuden a determinar cuál de los dos sistemas es el óptimo en la arquitectura de interés social en el estado de Puebla.

En el capítulo uno, se describen los lineamientos y alcances que guiarán esta investigación, así como un planteamiento general del experimento y la metodología que se seguirá para llegar a los objetivos propuestos.

En el capítulo dos, se muestran los antecedentes sobre construcción con tierra México, la situación de la arquitectura vernácula en el Estado de Puebla y el estado del arte referente a la construcción con tierra.

En el capítulo tres, se presenta un análisis bioclimático de la región, en donde se muestran con gráficas los diferentes fenómenos meteorológicos que determinan el clima de la región y al final del capítulo se concluyen las estrategias bioclimáticas que ayudarán a mejorar las condiciones de confort en las edificaciones de la región.

En el capítulo cuatro, se describen los dos sistemas constructivos que se analizarán en los prototipos, también se muestran los referentes en el mundo y los referentes constructivos en México.

En el capítulo cinco, se da una explicación sobre los distintos conceptos de nuestro marco de referencia, se tratan algunos conceptos básicos de termodinámica así como algunas propiedades termo físicas de los materiales utilizados en la investigación.

En el capítulo seis, se describen las propiedades termo físicas estudiadas en la investigación en la cuales se pondrá más atención al analizar los resultados obtenidos con el monitoreo de los prototipos.

En el capítulo siete, se describe el desarrollo experimental desde la construcción de los prototipos, la colocación de los instrumentos de medición, así como las condiciones de ambos prototipos, la discusión de los datos obtenidos, un análisis de costos de la construcción de ambos y hasta un acercamiento de lo que sería un análisis de huella de carbón para ambos casos.

En el capítulo ocho, se realiza un análisis térmico de los prototipos en Design Builder, comparando los sistemas constructivos en distintas regiones del país para determinar el comportamiento térmico de ambos sistemas en climas distintos al del caso de estudio.

PALABRAS CLAVE: Adobe, comportamiento térmico, sistema constructivo, tierra compactada, prototipos experimentales.

ABSTRACT

Currently more than 50% of homes around the world are built with soil. The use of this material represents a viable option to solve the problem of housing shortage, a situation that particularly affects developing countries. Some advantages of earthen architecture include recycling properties with very low embodied energy, excellent thermal properties that provides a comfortable indoor environment. This paper presents the characterization of a compacted rammed earthen prototype, and its thermal behavior relative to a conventional concrete block prototype, in the semi-cold temperate climate of the state of Puebla, Mexico. Both prototypes were built with similar geometry and dimensions and materials, except the walls. The methodology included three monitoring stages during representative underheating periods in the location. Concurrently with the monitoring, questionnaires to occupants were applied to determine the perception of their comfort conditions on both prototypes. Monitoring results and questionnaires indicated that even when dry bulb temperatures were slightly higher in the prototype of the compacted rammed earth prototype, the thermal lag was larger than that on the concrete block prototype. The results of the third monitoring period indicated that the radiant temperature on the rammed earth prototype was higher than in the concrete block and the questionnaires confirmed the perception better thermal comfort conditions in this prototype, relative to the block, wherein the perception was of a cold ambient condition. It is desirable that the results of this research can be applied in the construction of low-cost social housing in the region and that this can help to improve the quality of living, thermal comfort conditions and economy of the inhabitants and contribute to reduce the emission of greenhouse gases into the atmosphere, mitigating climate change.

KEYWORDS: Adobe, thermal performance, constructive system, rammed earth, experimental prototype

INDICE GENERAL

DEDICATORIAS	1
AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
1 CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	14
1.1 Antecedentes	14
1.2 Hipótesis	15
1.3 Objetivos	15
1.3.1 General	15
1.3.2 Particulares	15
1.4 Justificación	15
1.5 Metodología	16
1.6 Aporte al diseño	17
2 CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES	19
2.1 Arquitectura vernácula en el estado de Puebla	19
2.2 Construcción con tierra cruda en México	20
2.3 Problemas que enfrenta el proceso de diseño en la región	21
2.4 Los sistemas constructivos tradicionales utilizados en muros	23
2.4.1 Muros de adobe	23
2.4.2 Muros de tabique	24
2.4.3 Muros de block de concreto convencional	25
2.5 Estado del arte	26
3 CAPÍTULO 3 ANÁLISIS BIOCLÍMATICO	29
3.1 Análisis climatológico	30
3.2 Análisis de temperaturas horarias	31
3.3 Análisis de Humedad Relativa	32
3.4 Análisis de Humedad Relativa Horaria	33
3.5 Análisis de Precipitación y evaporación	34
3.6 Análisis de días grado	35
3.7 Análisis de Índice ombrotérmico	36

3.8	Análisis de temperatura efectiva corregida	37
3.9	Radiación solar	38
3.10	Análisis de triángulos de confort y estrategias bioclimáticas	39
3.11	Tablas de Mahoney (Determinación de las estrategias bioclimáticas)	40
4	CAPÍTULO 4 LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS	42
4.1	Sistema constructivo 1; Muros de tierra cruda compactada	42
4.1.1	Ventajas y desventajas del sistema constructivo	44
4.1.2	Ventajas:.....	44
4.1.3	Desventajas:.....	45
4.1.4	Referentes en México	45
4.2	Referentes en el mundo	48
4.3	Sistema constructivo 2. Sistema base, muros de block convencional	51
4.3.1	Ventajas:.....	52
4.3.2	Desventajas:.....	52
4.4	Referentes en México.....	53
5	CAPÍTULO 5 MARCO DE REFERENCIA.....	55
5.1	Conceptos básicos de termodinámica	55
5.2	Mecanismos de transferencia de calor	55
5.2.1	Conducción.....	55
5.2.2	Convección.....	57
5.2.3	Radiación.....	58
5.3	Propiedades térmicas de los materiales	59
5.3.1	Densidad	59
5.3.2	Conductividad térmica.....	60
5.3.3	Resistividad térmica (Valor R)	62
5.3.4	Retardo y amortiguamiento térmico.....	64
5.3.5	Amortiguamiento térmico.	66
6	CAPÍTULO 6 PROPIEDADES TÉRMICAS ESTUDIADAS EN LA INVESTIGACIÓN	69
6.1	Calor específico	69
6.2	Inercia térmica	70
6.3	Temperatura radiante media.....	71
7	CAPÍTULO 7 DESARROLLO EXPERIMENTAL	73

7.1	Diseño del experimento.....	73
7.2	Análisis de asoleamiento de los prototipos en el terreno	77
7.2.1	Análisis para el mes de marzo.....	78
7.2.2	Análisis para el mes de abril.....	79
7.2.3	Análisis para el mes de mayo	80
7.2.4	Análisis para el mes de junio	81
7.3	Construcción de los prototipos	82
7.4	Instrumentos de análisis térmico.....	95
7.5	Instalación de los instrumentos de medición	97
	Temperatura exterior:	97
	Prototipo de tierra / block convencional:	97
7.6	Realización de mediciones térmicas del 06 al 26 de marzo de 2016	99
7.7	Realización de mediciones térmicas del 10 al 29 de abril de 2016	105
7.8	Instalación de termómetro de globo para las mediciones térmicas del 29 de mayo al 04 de junio de 2016	107
7.9	Realización de mediciones térmicas del 29 de mayo al 04 de junio de 2016.....	109
7.10	Aplicación de encuestas para determinar la sensación térmica de los ocupantes en ambos prototipos.	111
7.11	ventajas económicas de la propuesta con tierra vertida compactada	114
7.12	Beneficios ambientales de la construcción con tierra cruda	116
8	CAPÍTULO 8 ANÁLISIS TÉRMICO CON DESIGN BUILDER.....	122
8.1	Herramientas digitales de análisis térmico	122
8.1.1	Ventajas y desventajas de las herramientas digitales.....	122
8.2	Análisis térmico de los prototipos con la herramienta Design Builder	123
8.3	Análisis termo-energético del experimento en distintos climas de nuestro país; Aquixtla, Puebla. Chihuahua, Chihuahua y Villahermosa Tabasco.	125
8.4	Optimización de los espesores en muros de TVC y BCC	132
9	APORTACIONES DEL TRABAJO Y CONCLUSIONES	141
10	BIBLIOGRAFIA.....	144
11	FUENTES DIGITALES CONSULTADAS	149
12	REFERENCIAS	150
13	CURRICULUM VITAE.....	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vivienda típica de dos niveles en la comunidad de Aquixtla Puebla.	20
Figura 2. Vivienda típica de un nivel en la comunidad de Aquixtla Puebla.	20
Figura 3. Tipología de vivienda hecha de adobe y teja.	21
Figura 4. Tipología de vivienda hecha de adobe y teja.	21
Figura 5. Ejemplo de tipología no unificada con la arquitectura vernácula de Aquixtla.	22
Figura 6. Vivienda de adobe fabricado en sitio.	23
Figura 7. Construcción con adobe y madera.	23
Figura 8. Fabricación del adobe. Foto: Emanuel Salinas.	24
Figura 9. Vivienda hecha con tabique rojo recocido.	25
Figura 10. Vivienda hecha con tabique rojo recocido.	25
Figura 11. Vivienda hecha con block de concreto convencional (BCC).	26
Figura 12. Vista general del municipio de Aquixtla, Puebla.	29
Figura 13. Croquis de localización del municipio de Aquixtla, Puebla.	29
Figura 14. Isotermas, estratificación de las temperaturas horarias.	31
Figura 15. Humedad relativa en porcentaje.	32
Figura 16. Isohigras, estratificación de la humedad relativa.	33
Figura 17. Precipitación y evaporación.	34
Figura 18. Días grado.	35
Figura 19. Índice ombrotérmico.	36
Figura 20. Temperatura efectiva corregida en °C.	37
Figura 21. Promedio mensual de radiación máxima total.	38
Figura 22. Promedio mensual de radiación total directa.	37
Figura 23. Triangulo de confort, mensual.	39
Figura 24. Estrategias bioclimáticas mensuales.	39
Figura 25. Pisones utilizados para compactación manual (Minke 2001).	42
Figura 26. Encofrado para Tapial (Minke 2001).	42
Figura 27. Vivienda construida con tierra en Marruecos. Foto: Imbtba.	43
Figura 28. Zona arqueológica de Paquimé, Casas Grandes Chihuahua.	45
Figura 29. Construcción de una casa de TVC diseñada por la Arq. Alejandra Caballero, Tlaxcala, México. (Foto: L. Guerrero)	46
Figura 30. Casa Ajijic, en Chapala Jalisco México, diseño de Tatiana Bilbao S.C. (Foto: T. Bilbao).	47
Figura 31. Ciudad vertical amurallada de Shibam en Yemen, construida con tierra cruda compactada (Foto: Khaled Nashar, Peter Pares y Twiga Swala).	48
Figura 32. Shibam en Yemen (Foto: Khaled Nashar, Peter Pares y Twiga Swala).	49
Figura 33. Shibam en Yemen (Foto: Khaled Nashar, Peter Pares y Twiga Swala).	49
Figura 34. Shibam en Yemen (Foto: Khaled Nashar, Peter Pares y Twiga Swala).	49
Figura 35. Zona arqueológica de Chan Chan, Perú. (Foto perteneciente a la UNESCO Autor: Jim Williams (20/02/2007).	50
Figura 36. Zona arqueológica de Chan Chan, Perú. (Foto perteneciente a la UNESCO Autor: Jim Williams (20/02/2007).	50
Figura 37. Zona arqueológica de Chan Chan, Perú. (Foto perteneciente a la UNESCO Autor:	

Jim Williams (20/02/2007).....	50
Figura 38. Vivienda entregada a una familia de damnificados en la localidad de Parral, Chihuahua.....	53
Figura 39. Representación gráfica de la inercia térmica.....	65
Figura 40. Gráfico del prototipo de tierra cruda compactada.....	73
Figura 41. Planta arquitectónica de ambos prototipos.....	74
Figura 42. Corte A-A' de ambos prototipos.....	75
Figura 43. Corte por fachada B-B' de ambos prototipos.....	76
Figura 44. Ubicación de los prototipos en del predio.....	77
Figura 45. Plano de ubicación de los prototipos dentro del predio.....	77
Figura 46. Marzo 21- 9 hrs.....	78
Figura 47. Marzo 21- 11 hrs.....	78
Figura 48. Marzo 21- 13hrs.....	78
Figura 49. Marzo 21- 15 hrs.....	78
Figura 50 Marzo 21- 17 hrs.....	78
Figura 51. Marzo 21 - Total.....	78
Figura 52. Abril 21- 9 hrs.....	79
Figura 53. Abril 21- 11 hrs.....	79
Figura 54. Abril 21- 13 hrs.....	79
Figura 55. Abril 21- 15 hrs.....	79
Figura 56. Abril 21- 17 hrs.....	79
Figura 57. Abril 21- Total.....	79
Figura 58. Mayo 21- 9 hrs.....	80
Figura 59. Mayo 21- 11 hrs.....	80
Figura 60. Mayo 21- 13 hrs.....	80
Figura 61. Mayo 21- 15 hrs.....	80
Figura 62. Mayo 21- 17 hrs.....	80
Figura 63. Mayo 21- Total.....	80
Figura 64. Junio 21- 9 hrs.....	81
Figura 65. Junio 21- 11 hrs.....	81
Figura 66. Junio 21- 13 hrs.....	81
Figura 67. Junio 21- 15 hrs.....	81
Figura 68. Junio 21- 17 hrs.....	81
Figura 69. Junio 21- Total.....	81
Figura 70. Triangulo de clases texturales, otorgado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.....	84
Figura 71. Selección de la tierra que se utilizó en la construcción del prototipo de tierra vertida compactada y los techos ambos prototipos.....	85
Figura 72. Trazo de los prototipos en el terreno.....	86
Figura 73. Colocación de guías (reventones) para iniciar el desplante del prototipo.....	87
Figura 74. Rascado de la base para poder nivelar el desplante de los prototipos en el terreno.....	87
Figura 75. Colocación de los blocks de concreto convencional en el sentido horizontal.....	87

Figura 76. Colocación de la madera en la techumbre que dará sustento a la tierra compactada.	88
Figura 77. Colocación de las vigas que darán sustento a la techumbre del prototipo.	88
Figura 78. Colocación de la capa de tierra en la techumbre de ambos prototipos.	89
Figura 79. Colocación de la capa de tierra en la techumbre de ambos prototipos.	89
Figura 80. Colocación de la capa de tierra en la techumbre de ambos prototipos.	89
Figura 81. Colocación de la barrera perimetral de 10cm de altura.	89
Figura 82. Colocación de las tejas de barro recocido.	90
Figura 83. Vista interior de la techumbre.	90
Figura 84. Limpieza de la madera que se ocupó para el encofrado de los muros de tierra vertida compactada.	91
Figura 85. Capa de tierra compactada dentro del encofrado.	92
Figura 86. Armado del encofrado de madera que servirá para confinar los muros de tierra.	92
Figura 87. Prototipo de TVC con techumbre.	93
Figura 88. Ambos prototipos, al fondo el prototipo de block convencional ya revocado.	93
Figura 89. Armado de la cimbra que se utilizó para hacer los muros de TVC.	93
Figura 90. Ambos prototipos ya terminados, al fondo el prototipo de block convencional y al frente el de tierra compactada, vista sur-oeste.	94
Figura 91. Vista este del prototipo de block de concreto convencional.	94
Figura 92. Detalle de la techumbre de ambos prototipos.	94
Figura 93. Ambos prototipos ya terminados, al fondo el prototipo de block convencional y al frente el de tierra compactada, vista sur-este.	94
Figura 94. Data-logger Marca: Lascar, Modelo: EL-USB-2-LCD (Foto tomada de la Pág. Oficial de Lascar).	95
Figura 95. Data-logger para superficie Marca: Lascar, Modelo: EL-USB-TC-LCD (Foto tomada de la Pág. Oficial de Lascar).	96
Figura 96. Instrumento multifuncional portátil Data-logger marca Delta OHM, modelo; DO 9847K (Foto tomada de la Pág. Oficial de Delta OHM).	96
Figura 97. Sonda globo-termómetro para medir el calor radiante, diámetro de 150 mm.	97
Figura 98. Instalación de data logger en muros interiores de ambos prototipos.	98
Figura 99. Instalación de caja de Stevenson con data logger en el centro de ambos prototipo.	99
Figura 100. Instalación de data logger en el plafón de ambos prototipos.	99
Figura 101. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 16 de marzo de 2016.	100
Figura 102. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 23 de marzo de 2016.	101
Figura 103. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 09 de marzo de 2016.	102
Figura 104. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior del día 10 de marzo de 2016.	102
Figura 105. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 11 de marzo de 2016.	103

Figura 106. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 12 de marzo de 2016.	103
Figura 107. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 19 de marzo de 2016.	104
Figura 108. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 21 de marzo de 2016.	104
Figura 109. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 12 de abril de 2016.	105
Figura 110. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 21 de abril de 2016.	106
Figura 111. Instalación de termómetro de globo en el prototipo de tierra cruda compactada.	108
Figura 112. Instalación de termómetro de globo en el prototipo de tierra cruda compactada.	108
Figura 113. Instalación de termómetro de bulbo seco en muros este y sur de ambos prototipos.	108
Figura 114. Instalación de caja de Stevenson y termómetro de globo, termómetro de bulbo seco dentro del prototipo de tierra cruda compactada.	109
Figura 115. Instalación de caja de Stevenson y termómetro de globo, termómetro de bulbo seco dentro del prototipo de tierra cruda compactada.	109
Figura 116. Comportamiento térmico de ambos prototipos, temperatura exterior y temperatura de globo en el prototipo de TVC para el día 29 de mayo de 2016.	110
Figura 117. Comportamiento térmico de ambos prototipos, temperatura exterior y temperatura de globo en el prototipo de tierra para el día 01 de junio de 2016.	111
Figura 118. Modelo de encuesta que se utilizó para determinar la sensación térmica de los ocupantes en ambos prototipos.	112
Figura 119. Sensación térmica de los ocupantes antes de entrar al prototipo.	113
Figura 120. Sensación térmica de los ocupantes dentro del prototipo de BCC.	113
Figura 121. Sensación térmica de los ocupantes antes de entrar al prototipo.	113
Figura 122. Sensación térmica de los ocupantes dentro del prototipo de TVC.	113
Figura 123. Energía incorporada en el prototipo hecho con block de concreto convencional.	119
Figura 124. Energía incorporada en el prototipo hecho con tierra vertida compactada.	119
Figura 125. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Aquixtla, Puebla.	125
Figura 126. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Aquixtla, Puebla.	125
Figura 127. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Aquixtla Puebla.	126
Figura 128. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Aquixtla Puebla.	127
Figura 129. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Chihuahua Chih.	128
Figura 130. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Chihuahua Chih.	128

Figura 131. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Chihuahua Chih.	129
Figura 132. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Chihuahua Chih.	129
Figura 133. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Villahermosa Tab.....	130
Figura 134. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Villahermosa Tab.....	131
Figura 135. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Villahermosa Tab.....	131
Figura 136. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Villahermosa Tab.....	132
Figura 137. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Aquixtla, Puebla.....	133
Figura 138. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Aquixtla, Puebla.....	134
Figura 139. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Aquixtla, Puebla.....	135
Figura 140. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Aquixtla, Puebla.....	135
Figura 141. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Chihuahua Chih.	136
Figura 142. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Chihuahua Chih.	136
Figura 143. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Chihuahua Chih.	137
Figura 144. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Chihuahua Chih.	137
Figura 145. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Villahermosa Tab.....	138
Figura 146. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Villahermosa Tab.....	139
Figura 147. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Villahermosa Tab.....	139
Figura 148. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Villahermosa Tab.....	140

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Temperatura efectiva corregida.	37
Tabla 2 Densidades de algunos materiales, Sears, Francis W., Zemansky, Mark W., Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. (2004).....	60
Tabla 3 Conductividad térmica de algunos materiales.....	62
Tabla 4 Resistividad de los materiales, tomada del libro de Fernando Tudela Eco diseño	63
Tabla 5 Calor específico de distintos materiales.	69
Tabla 6 Clasificación de los componentes de la tierra de acuerdo a su tamaño.....	82
Tabla 7 Análisis de costos de ambos prototipos.	115
Tabla 8 Tabla de energía implícita de los materiales utilizados en la construcción del prototipo de BCC, elaboración basada en las tablas de (Wooley et al, 1997) (Vale, 1991) (Daumal et al, 1978) (Roodman et al, 1995) Edwards, 1999) (Mazria, 1979)	118
Tabla 9 Tabla de energía implícita de los materiales utilizados en la construcción del prototipo de TVC, elaboración basada en las tablas de (Wooley et al, 1997) (Vale, 1991) (Daumal et al, 1978) (Roodman et al, 1995) Edwards, 1999) (Mazria, 1979)	118
Tabla 10 Datos climáticos de Aquixtla, Chihuahua y Villahermosa.....	124

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 1. Intensidad de flujo en la conducción del calor	56
Fórmula 2. Coeficiente de película de un fluido.....	57
Fórmula 3. Intensidad de radiación que emite un cuerpo.....	59
Fórmula 4. Densidad	59
Fórmula 5. Conductividad.....	61
Fórmula 6. Retardo térmico o difusividad	64
Fórmula 7. Amortiguamiento térmico.....	67
Fórmula 8. Inercia térmica.....	70
Fórmula 9. Temperatura Radiante media.....	71

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



1 CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La autoconstrucción juega un papel importante en las zonas rurales y semi-rurales de la Sierra Norte del estado de Puebla, en la cual se tiene un acercamiento un tanto certero de lo que podrían aportar los sistemas constructivos en cuestión de confort térmico, sin embargo, como lo dice Fernando Tudela: “La arquitectura tradicional de las zonas cálidas áridas utiliza intuitivamente el recurso de la acumulación térmica al disponer construcciones de gruesas particiones de piedra o adobe con escasas aberturas, pero lo hace a través de procesos empíricos, que no permiten cuantificar y por ende controlar los efectos físicos obtenidos y que no generan alternativas para las condiciones de absorción/ restitución”. (Tudela, Fernando, 1982) Es el mismo caso para la región de la Sierra norte del estado de Puebla en donde no existen tales datos medidos y comprobables que nos demuestren cual es el sistema constructivo para muros que mejor se adapta a las condiciones climáticas de la región y que favorezca al acercamiento óptimo de confort térmico para espacios cerrados.

Es necesario conocer los materiales utilizados en los sistemas constructivos de la región de una manera certera para poder analizar los sistemas constructivos tanto convencionales como no convencionales, considerando que el clima, la orografía y los recursos naturales disponibles, son elementos que determinan la tipología y tendencias constructivas en la arquitectura que hasta la fecha es de tipo tradicional, que no deja de lado la parte pintoresca de los pueblos mexicanos.

El caso de estudio será el municipio de Aquixtla, (La palabra correcta en mexicano es Aquiztla, compuesta de ATL, agua; QUIZA, salir y TLA, abundancia; por lo tanto, A-QUIZTLA significa “(donde) sale abundante agua”), enclavado en la sierra norte del estado de Puebla, es un municipio que está rodeado de montañas, presenta un clima templado con lluvias en verano y bajas temperaturas en invierno, presenta una temperatura media anual de 15.7° con una mínima normal de 10.3°, precipitación normal de 727.9 mm y una temperatura máxima normal de 21.1°.

Según el estudio climatológico se tienen 3531.7 días grado de calentamiento, lo cual nos hace pensar en la gran cantidad de energía que actualmente se destina para mejorar las condiciones térmicas al interior de los espacios.

Lo acechan muchos retrasos económicos como en muchas partes del país, problemas económicos y socioculturales, que se transfieren y reflejan en la arquitectura de la región, pese a esto, la forma de construir de las viviendas no tendría que limitar el esfuerzo por conocer y aprovechar el mejor Sistema constructivo para muros que mejor se adapte y genere el mayor confort térmico posible en las viviendas de la región. Actualmente los sistemas constructivos para muros más utilizados basan su rentabilidad en el

tiempo en que son contruidos, y en segundo término en el costo a corto plazo. Desafortunadamente en la mayoría de los casos no se toma en cuenta el beneficio térmico que cada sistema constructivo nos brinda, esto se debe a la falta de información referente al tema, otro factor que influye es porque el construir con muros que impliquen un tratamiento o consideración térmica, suelen ser más costosos que los convencionales, por el tiempo que requieren para su construcción y por el costo inicial más elevado respecto a los muros de construcción convencional.

1.2 HIPÓTESIS

Un sistema constructivo basado en tierra cruda puede ser más confortable térmicamente, tener mayor eficiencia energética y reducir el consumo de energía para calefacción convencional que un sistema constructivo convencional industrializado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 General

Caracterizar el comportamiento térmico de un sistema constructivo basado en muros de tierra cruda compactada, en comparación con un sistema constructivo convencional.

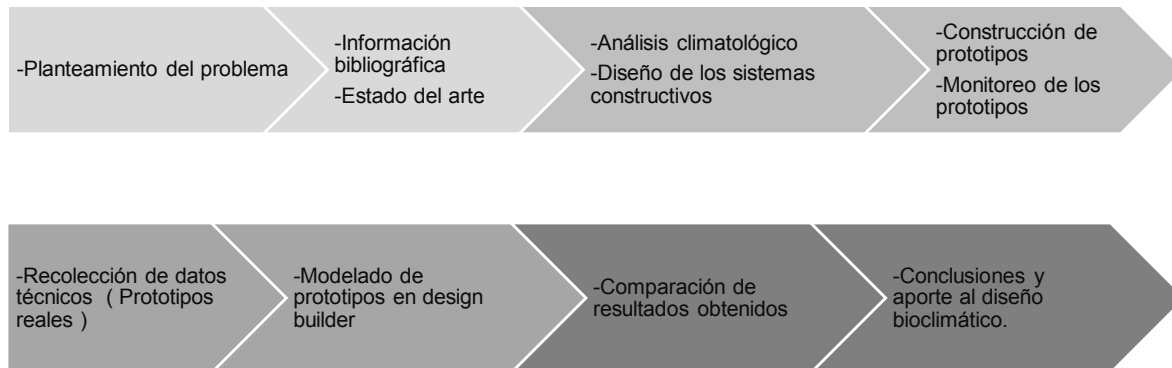
1.3.2 Particulares.

- a) Construir dos prototipos, uno con tierra cruda compactada y el otro con un sistema constructivo convencional utilizado en la región, con las mismas características espaciales; espesor de muros, espesor en techumbre, tamaño y posición de puerta y ventanas, los cuales tomarán en cuenta las dimensiones representativas de una recámara en una vivienda de interés social en un ambiente de bajos recursos económicos.
- b) Registrar la temperatura al interior de ambos prototipos en periodos de tiempo representativo de bajas y altas temperaturas.
- c) Establecer las ventajas y desventajas de los sistemas constructivos establecidos.

1.4 JUSTIFICACIÓN.

Es necesario realizar estudios de sistemas constructivos alternativos que presenten condiciones adecuadas de confort térmico y ahorro de energía en la región.

1.5 METODOLOGÍA.



La metodología propuesta para lograr los objetivos en esta investigación es basada en el método científico, ya que se requieren datos que puedan ser medidos, verificados y comprobados a través de las ciencias formales pero también de las ciencias fácticas. Esto no descarta la posibilidad de obtener información por medio de la bibliografía empleada, tal como lo dice Mario Bunge en su libro *La ciencia, su método y su filosofía*: “En ocasiones, puede alcanzarse una verdad con sólo consultar un texto. Los propios científicos recurren a menudo a un argumento de autoridad atenuada: lo hacen siempre que emplean datos (empíricos o formales) obtenidos por otros investigadores —cosa que no pueden dejar de hacer, pues la ciencia moderna es, cada vez más, una empresa social—. Pero, por grande que sea la autoridad que se atribuye a una fuente, jamás se la considera infalible: si se aceptan sus datos, es sólo provisionalmente y porque se presume que han sido obtenidos con procedimientos que concuerdan con el método científico, de manera que son reproducibles por quienquiera que se disponga a aplicar tales procedimientos. (Bunge, 1966) En otras palabras: un dato será considerado verdadero hasta cierto punto, siempre que pueda ser confirmado de manera compatible con los cánones del método científico”. Siendo el método científico un punto de partida para lograr que el proyecto concluya de una manera eficaz, nos apegaremos en todo momento a los principios que dicho método demanda.

1.6 APORTE AL DISEÑO.

- Proporciona un método de construcción alternativo basado en muros de tierra cruda compactada.
- Reduce los costos de material para vivienda de bajo presupuesto al tener la tierra en el mismo sitio, ahorrando costos de transportación y costos de materia prima para muros.
- Reduce la huella ecológica al ser un sistema constructivo ecológico que no requiere consumo energético para transportación de materia prima.
- Es un sistema que disminuye el consumo energético por calefacción en las zonas marginadas de la sierra norte de Puebla.
- Ayuda al proceso de construcción y autoconstrucción de la región puesto que es un sistema constructivo que no requiere la aplicación de tecnologías inaccesibles para el auto constructor.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES



2 CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

2.1 ARQUITECTURA VERNÁCULA EN EL ESTADO DE PUEBLA

“A la arquitectura vernácula generalmente se le refiere como la edificación de características particulares y tradicionales, propias de la región en la que se enclava, habitualmente realizadas por constructores empíricos de una manera informal; es decir, sin el empleo de métodos de diseño” (Díaz, 2010) Por lo tanto, es una arquitectura que se ha desarrollado de acuerdo a la región a la que pertenece, esto hace que la arquitectura sirva como un identificador que se desarrolla basada en las costumbres y problemas socio-culturales de los habitantes y que los mismos han tomado como símbolo de pertenencia, ya lo mencionaba Rapoport en 1972, “la arquitectura vernácula está fuertemente influenciada por los aspectos socio-culturales y no solamente por los aspectos del clima”. (Rapoport, 1972)

Entonces, dado que la arquitectura vernácula es la que se desarrolla de manera colectiva por los nativos de cierta región, la gente toma los materiales existentes en su entorno y son materiales que fomentan la sustentabilidad puesto que son materiales que no requieren ser transportados, se adaptan de manera eficaz al clima y son materiales fáciles de manejar en sistemas constructivos sencillos que las personas han conocido y que son herencia de las generaciones anteriores. Por ello, la arquitectura vernácula raramente evoluciona de manera rápida, al contrario, mantiene su esencia y carácter en lapsos muy prolongados de tiempo. Seguramente nos preguntaremos ¿Por qué la arquitectura vernácula no cambia?, esto se puede explicar de una manera sencilla; la necesidad de copiar que el ser humano ha tenido a lo largo de la historia, se refleja en la tipología constructiva de todas las regiones, el hombre por naturaleza está acostumbrado a copiar, copiar cosas que creé son las mejores para un fin específico, esto lo ha orillado a seguir copiando lo que desde años atrás se ha hecho, sin embargo la realidad es que no todo lo que es vernáculo es lo más óptimo, existen aciertos y errores. Por ello es necesario fomentar la participación colectiva de gente especializada que ayude a guiar de manera asertiva los rumbos de la arquitectura vernácula, a través de estudios como el que se plantea en esta y las demás investigaciones.

Un aspecto que no puede pasar desapercibido a la hora de pensar en el análisis de la arquitectura vernácula es la fuerte influencia que la corona española nos ha heredado desde tiempos de la conquista y así mismo se ha venido fusionando con las formas de organización que nuestros ancestros desarrollaron de manera importante en las antiguas civilizaciones, sin perder el objetivo principal de toda esta arquitectura que es el de dar abrigo a las personas sobre las condiciones climáticas.

A continuación se presentan algunas imágenes donde se muestra la tipología de la región, misma que es construida y desarrollada por las personas oriundas y que se vienen transmitiendo de generación en generación desde la fundación del municipio en 1788, (Ver Figuras 1 y 2).



Figura 2. Vivienda típica de dos niveles en la comunidad de Aquixtla Puebla.



Figura 1. Vivienda típica de un nivel en la comunidad de Aquixtla Puebla.

2.2 CONSTRUCCIÓN CON TIERRA CRUDA EN MÉXICO

Durante toda la historia de México se ha utilizado a la tierra cruda como material básico de construcción. Esto ha permitido desarrollar respuestas arquitectónicas con gran eficiencia en el manejo de los recursos naturales y con un alto grado de adaptación a las condiciones climáticas existentes en las diversas latitudes del país. (Manuel Rodríguez y otros, 2002). Sin embargo dicha arquitectura se ha desarrollado de manera lenta puesto que como ya lo vimos; la arquitectura vernácula avanza de manera ineficaz porque los conocimientos respecto al desarrollo de los sistemas constructivos se dan de una manera autónoma y poco se invierte en el desarrollo de estos sistemas constructivos.

Un gran problema al que se enfrenta la construcción con tierra en el mundo es que hasta la fecha no se ha podido tecnificar, estandarizar y crear un sistema óptimo de construcción basado en tierra del que se tengan datos técnicos referentes al comportamiento térmico y a la optimización del proceso constructivo porque la tierra es un material que varía sus características físico-mecánicas de acuerdo a la región a la que pertenece, además, un sistema constructivo basado en tierra cruda necesita ciertos materiales auxiliares que aportan estructura, soporte, adherencia, volumen, plasticidad, consistencia entre otras propiedades al sistema y estos “auxiliares” del sistema constructivo, también son diferentes en todo el mundo, por ello la

gran dificultad para poder lograr que a dichos sistemas constructivos se les destine el apoyo económico suficiente para optimizarlos.

La insuficiente comunicación del conocimiento empírico versus científico ha generado una limitante a la que Almeida denomina “literatura gris”. (Almeida M.R., 1998) Dicha limitante con frecuencia impide la creación de nuevos paradigmas que presenten soluciones a problemas específicos; en este caso, relacionados con materiales que utilizan al suelo como materia prima.

Sin embargo, distintas instituciones como el Departamento de medio ambiente de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco y Xochimilco, Proyecto San Isidro: Educación Permanente, S.C., PROTERRA Red Iberoamericana de Arquitectura y Construcción con Tierra, son grupos de personas o asociaciones de México comprometidas con la construcción de bajo impacto en el medio se han preocupado por el estudio, difusión e implementación de sistemas constructivos basados en la tierra cruda. Todos con el objetivo final de mitigar el fuerte impacto ecológico que tiene la construcción en el mundo y algunos otros con la finalidad de mejorar las condiciones de vivienda en México, desarrollando viviendas de bajo costo, bajo impacto ambiental y sobre todo auto -construibles.

2.3 PROBLEMAS QUE ENFRENTA EL PROCESO DE DISEÑO EN LA REGIÓN

La Sierra Norte del estado de Puebla es una región que se caracteriza porque su arquitectura es en su mayoría vernácula y de autoconstrucción, es una arquitectura que tiene un alto valor estético, es muy pintoresca y en su mayoría conserva una tipología similar, (Ver Figuras 3 y 4). Los materiales de construcción que comúnmente se utilizan son el adobe, tabique de barro cocido, teja de barro y la madera como auxiliar en estructuras de techumbres.



Figura 4. Tipología de vivienda hecha de adobe y teja.



Figura 3. Tipología de vivienda hecha de adobe y teja.

Sin embargo, en las últimas décadas se han introducido ciertos materiales que antiguamente no se veían en la región, materiales con un proceso de fabricación industrial y de alto impacto en el medio, que no pertenecen a la tipología vernácula que se venía haciendo hasta unas dos décadas anteriores.

La introducción de estos nuevos materiales que no corresponden a la arquitectura vernácula de la región genera una serie de problemas que retrasan el desarrollo económico de los oriundos, fomentan una arquitectura que no se compromete con el cuidado del medio ambiente y descompone la tipología regional que ha caracterizado los pueblos de México, (Ver Figura 5). Otro de los grandes problemas que acechan a la arquitectura vernácula es la falta de conocimientos técnicos referentes a los procesos constructivos, el



Figura 5. Ejemplo de tipología no unificada con la arquitectura vernácula de Aquixtla.

proceso de diseño y la importancia de seguir construyendo con materiales locales, de bajo consumo energético y una amplia disponibilidad.

Por ello, con la realización de este proyecto se pretende caracterizar un sistema constructivo que se adapte a las necesidades constructivas, que favorezca la utilización de los materiales locales, tenga bajo impacto ambiental, garantice espacios más confortables y reduzca el gasto energético utilizado para calefacción.

Será necesario optimizar y documentar el proceso constructivo para muros hechos con tierra cruda compactada y así colaborar en el desarrollo de la arquitectura vernácula, documentar los datos térmicos obtenidos y con ellos difundir el comportamiento del sistema constructivo. Ayudando con esto al desarrollo de la autoconstrucción y desarrollar una alternativa constructiva para vivienda de bajo presupuesto.

2.4 LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS TRADICIONALES UTILIZADOS EN MUROS

En la actualidad, la arquitectura vernácula de la región ha sufrido cambios importantes puesto que como vimos anteriormente se han introducido nuevos materiales industrializados y semi-industrializados que no corresponden con la tipología clásica de la región, dando como resultado una arquitectura que no sigue una misma tipología y por ende descompone el lado estético de la misma. Sin embargo ese no es el único problema al que se enfrenta la arquitectura vernácula de la región, además, no hay un sistema constructivo para muros del que se tenga registrado algún dato preciso que dé sustento al sistema constructivo de mejor comportamiento térmico. A continuación se mostraran los distintos sistemas constructivos en muros utilizados en la región y algunas características:

2.4.1 Muros de adobe

Lo muros de adobe son aquellos muros portantes que se forman mediante adobes traslapados en hiladas hasta formar ciertas alturas, (Ver figuras 6 y 7). La fabricación de los adobes generalmente se hace en el sitio donde se construirá el edificio planeado. “La técnica consiste básicamente en el moldeado de bloques de barro de dimensiones que varían según la tradición local, que se secan al sol y posteriormente permiten



Figura 6. Vivienda de adobe fabricado en sitio.



Figura 7. Construcción con adobe y madera.

construir estructuras portantes de muros, arcos, bóvedas o cúpulas por hiladas sobrepuestas”. (Guerrero Baca L. F., 2014)(Ver Figura 8).

Los adobes son sobrepuestos y pegados con una masa hecha del mismo barro con el que se hacen las piezas, como lo menciona el Dr. Guerrero “Otro aspecto de alta relevancia en la estructuración de los muros y que también incide en su posibilidad de funcionar monolíticamente es el mortero de junta. Es fundamental tener una mezcla lo más parecida posible a los adobes, tanto en sus características granulométricas como en su proceso de estabilización.” (Guerrero Baca L. F., 2014)



Figura 8. Fabricación del adobe. Foto: Emanuel Salinas.

2.4.2 Muros de tabique

Los muros de tabique rojo recocido son muros se forman mediante tabiques traslapados en hiladas hasta formar ciertas alturas. Una de las diferencias significativas respecto a los muros de adobe es que los muros de tabique tienen un valor más alto en cuanto a su resistencia a la compresión, generalmente es de 250 kg/cm². (el adobe 50 kg/cm²).

Al igual que los adobes, los tabiques se hacen mediante el moldeado de la masa de barro con un alto contenido de arcilla y mezclado con agua hasta obtener una mezcla homogénea, se deja secar y posteriormente se mete al horno por unas 15 horas hasta que los tabiques adquieren un tono rojizo. El

muro de tabique es uno de los preferidos en la región porque posee un alto valor estético, sin embargo su uso cada vez es menor porque las dimensiones de los bloques son menores en comparación del block de concreto y esto hace más costoso el gasto inicial en la construcción de vivienda. (Ver figuras 9 y 10).



Figura 9. Vivienda hecha con tabique rojo recocido.



Figura 10. Vivienda hecha con tabique rojo recocido.

2.4.3 Muros de block de concreto convencional

Los muros de block de concreto convencional (BCC) han tomado bastante importancia en la construcción regional, desplazando así a la utilización del adobe y tabique. Los muros de block están constituidos por el traslape en forma de hiladas del block de concreto, este se acomoda en forma de soga hasta lograr que el muro tenga cierta altura, generalmente se alcanza una altura de 2.4m , si se requiere un muro más alto a esta distancia tendrá que colocarse un refuerzo horizontal con acero y concreto.

Sin duda alguna, los muros de BCC se han convertido en una forma muy común de construir, su facilidad constructiva y su resistencia a la lluvia lo han posicionado como el más utilizado en la región, sin embargo, no estamos conscientes de la energía incorporada que este tipo de materiales trae consigo, y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) que provoca la elaboración industrial de los BCC. Otro de los grandes problemas que trae consigo el construir muros de BCC es que se incorpora además el cemento y acero, materiales con un alto impacto ecológico y que además encarecen la construcción.

Para la fabricación de los blocks de concreto convencional se requiere la extracción de piedra caliza, arena y la utilización de cemento portland. La piedra caliza se tritura, se le agrega el concreto hecho con cemento y arena, se mezcla y se vierte sobre los moldes, se compacta y se retira del molde para que este seque y así pueda ser utilizado a los 28 días de ser fabricado. Los blocks son pegados con un mortero basado en cemento haciendo hiladas de blocks hasta llegar la altura deseada del muro. (Ver Figura 11)



Figura 11. Vivienda hecha con block de concreto convencional (BCC).

2.5 ESTADO DEL ARTE

Hablar de los sistemas constructivos en muros, generalmente implica el análisis del proceso constructivo que conlleva a la elaboración del muro, es decir, qué materiales se ocuparán para su elaboración, las distintas técnicas que el hombre ha adaptado para hacerlo de una forma más sencilla, tiempos de elaboración, etc...Encontramos amplia información referente al método constructivo. Sin embargo, el estudio del comportamiento térmico de dichos sistemas constructivos y cómo responde este al medio ambiente en el que se encuentra es menos común puesto que su análisis implica un gran esfuerzo, más allá de la experiencia constructiva, implica también ciertos conocimientos respecto a temas más específicos de termodinámica, física, tiempo, dinero y sobre todo conciencia de que los resultados obtenidos con la investigación favorecerán en el desarrollo tecnológico de la arquitectura bioclimática y esta sea un impulso para colaborar con este tipo de aportes científicos.

Dentro de los sistemas constructivos basados en tierra cruda, el de tierra cruda vertida compactada es el menos estudiado, puesto que con la llegada de los españoles a México se implementó el uso del adobe y

se desplazó la técnica de muros apisonados. Pero creemos importante reincorporar el sistema a la construcción tradicional, ya que ofrece grandes ventajas que contribuyen al desarrollo de la construcción de bajo presupuesto, es un sistema auto-construible y además ofrece ventajas de confort.

Es importante mencionar el gran esfuerzo y trabajo que las instituciones como la UAM-Xochimilco y UAM-Azcapotzalco han mostrado por el estudio del comportamiento térmico del sistema constructivo basado en tierra cruda compactada, El Dr. Luis Guerrero y el Dr. José R. García han iniciado desde años atrás un nexo de trabajo conjunto que ha desarrollado y tratado de caracterizar tal sistema. Sin embargo, las condiciones climáticas de la Sierra norte de Puebla son cambiantes respecto a las del Distrito Federal, donde se han realizado estudios térmicos que comparen dos módulos experimentales. Teniendo claro que los estudios que se hayan realizado respecto al Sistema de Tierra cruda compacta impactan directamente en los avances tecnológicos de la región en que se realizan, (en este caso sería el D.F.) nos apoyaremos de dichos resultados para guiar la investigación de manera eficiente y así contribuir en el desarrollo de la técnica.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS BIOCLIMÁTICO



3 CAPÍTULO 3 ANÁLISIS BIOCLÍMATICO

Ubicado en la Sierra Norte del Estado de Puebla, el municipio de Aquixtla ocupa un lugar de los 217 municipios del estado, cuenta con 190.06 km² de extensión territorial y 7386 habitantes. (SEDESOL, 2013). Limita al norte con el municipio de Zacatlán; al oriente con Tetela de Ocampo; al sur con Ixtacamaxtitlán; y al poniente con Chignahuapan. Forma parte de la Sierra Madre Oriental de la cual en dicha región está limitada por altas montañas unidas por pequeñas mesetas, provocando una diferencia de altura en puntos distintos del mismo municipio de hasta 700 metros. (Ver Figuras 12 y 13).



Figura 12. Vista general del municipio de Aquixtla, Puebla.

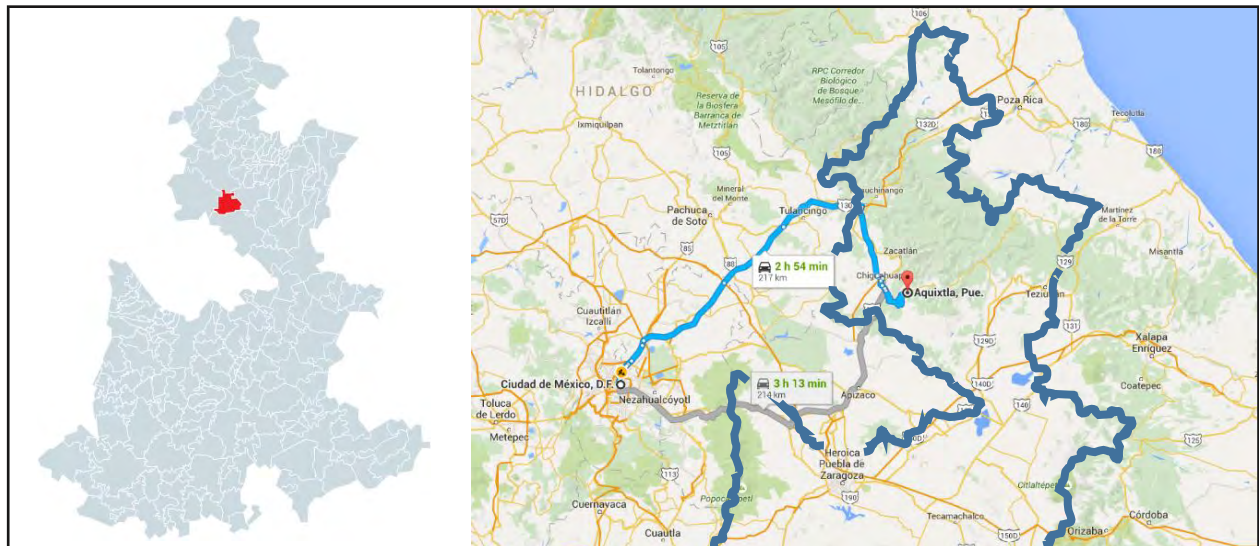


Figura 13. Croquis de localización del municipio de Aquixtla, Puebla.

3.1 ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO

Localidad: Aquixtla Puebla, México

Latitud: 19° 47'44'' N.

Longitud: 097° 56'08'' W

Altura: 2192 MSNM

Clima: Cb s(x')(i') (Templado, poca oscilación, no es tipo Ganges, canícula)

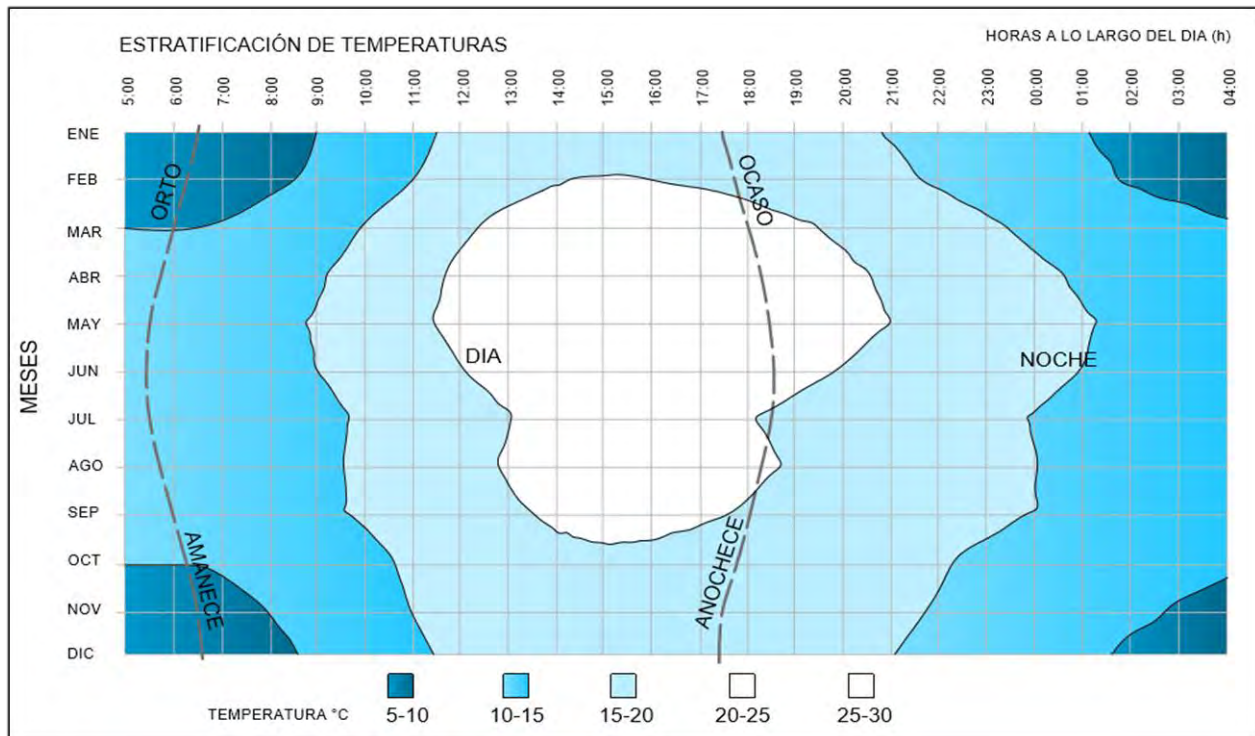
Bioclima: Semi-frío

Datos generales del clima

-
- | | | |
|---|---------------------------|---------|
| - | Temperatura máxima: | 18.2°C |
| - | Temperatura media: | 15.7°C |
| - | Temperatura mínima: | 13.0°C |
| - | Precipitación máxima: | 146.7mm |
| - | Precipitación mínima: | 11.2mm |
| - | Precipitación total: | 727.9mm |
| - | P/T: | 46.44 |
| - | % precipitación invernal: | 5.52% |
| - | Oscilación: | |
-

Durante todo el año las temperaturas mínimas y medias se ubican por debajo de la zona de confort mensual (definida de acuerdo a las fórmulas de Szokolay) siendo enero y febrero los meses más fríos con un promedio de mínimas de 7.1 y 7.7 °C. Respecto a las temperaturas medias, se presenta una temperatura muy similar, desde los 16°C y no excediendo los 18°C desde el mes de marzo hasta el mes de septiembre. La línea de temperaturas promedio máximas se encuentra dentro de la línea de confort en los meses que van de febrero a noviembre, mayo se presenta como el mes más caluroso sin embargo desde el mes de febrero y hasta el mes de octubre las temperaturas máximas extremas superan los 30°C. Es importante mencionar que en los meses que van de noviembre a marzo podemos encontrarnos con registros de temperaturas mínimas extremas que pueden llegar a los -7°C y de febrero a octubre temperaturas máximas extremas por encima de los 30°C y hasta los 37°C.

3.2 ANÁLISIS DE TEMPERATURAS HORARIAS



En la Figura 14 se puede observar el comportamiento horario de la temperatura del ambiente, como lo pudimos ver en los datos de la página anterior, las temperaturas a lo largo de todo el año son bajas respecto al rango de confort, si tomamos en cuenta que dicho rango de confort va de los 20 a los 25°C, solamente se alcanzan estos niveles de temperatura en los meses que van de abril a junio en horarios de las 13:00hrs a las 17:00hrs y en los meses de marzo, julio agosto y septiembre en horarios de 14:00hrs a las 16:00hrs. El resto del año se encuentra en rangos de desconfort térmico alcanzando temperaturas por debajo de los 10°C en horarios de las 2:00hrs a las 9:00hrs en meses como enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre. Los amaneceres son fríos a lo largo de todo el año, alcanzan temperaturas entre 10 y 15°C en meses que van de marzo a octubre y temperaturas debajo de 10°C en meses de noviembre a febrero. Por las tardes, a partir de las 19:00 la temperatura empieza a descender hasta entrada la noche y a partir de las 22:00 la temperatura bajas hasta alcanzar niveles bajo 10°C a 5°C.

3.3 ANÁLISIS DE HUMEDAD RELATIVA

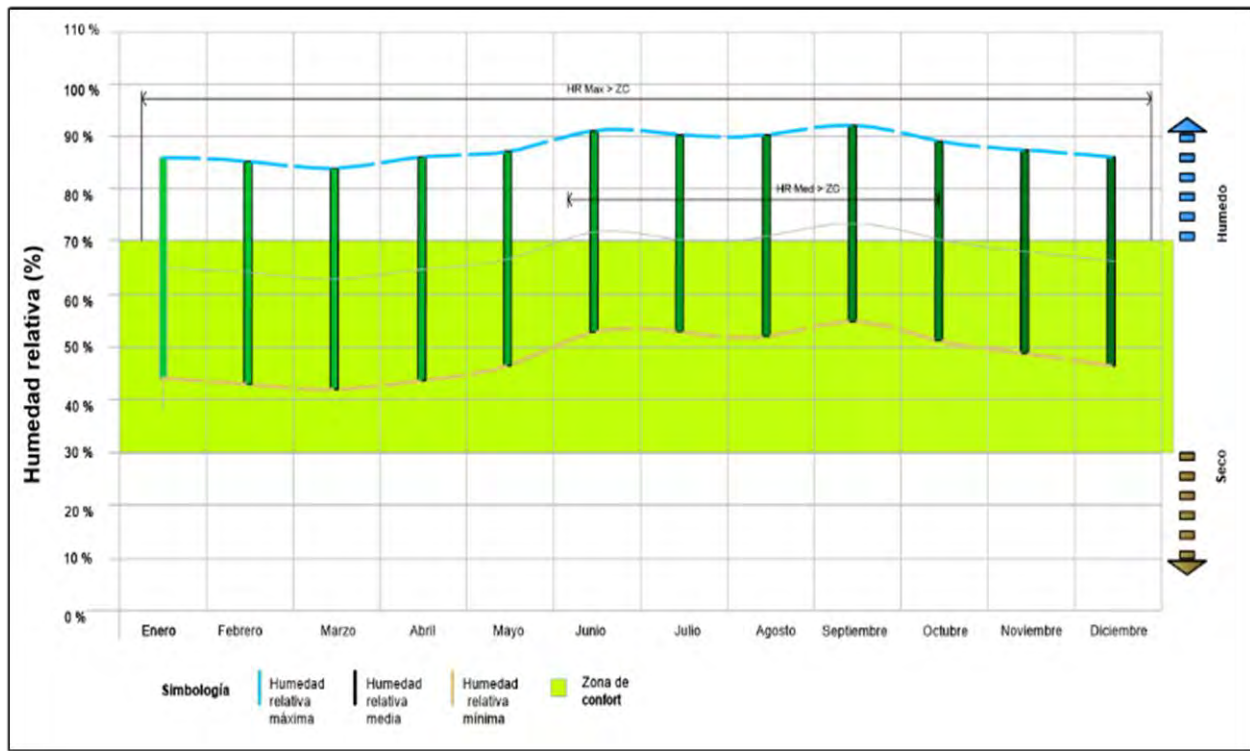


Figura 15. Humedad relativa en porcentaje.

La humedad relativa que se presenta en la localidad es alta por las mañanas a lo largo de todo año, alcanzando niveles porcentuales del 92% en los meses de junio y septiembre y el resto de los meses por arriba del 80% de humedad relativa. Como lo muestra la Figura 15, por las tardes la humedad se regula y las mínimas de todo el año se localizan dentro del área de confort marcando datos que van de entre el 42% y el 55%. De manera general podemos ver que la humedad relativa media de todo el año se encuentra dentro de los límites de confort, es decir entre el 60% y el 70% excepto los meses de julio y septiembre donde dicha humedad excede los límites llegando a los 73 puntos en la escala porcentual.

3.4 ANÁLISIS DE HUMEDAD RELATIVA HORARIA

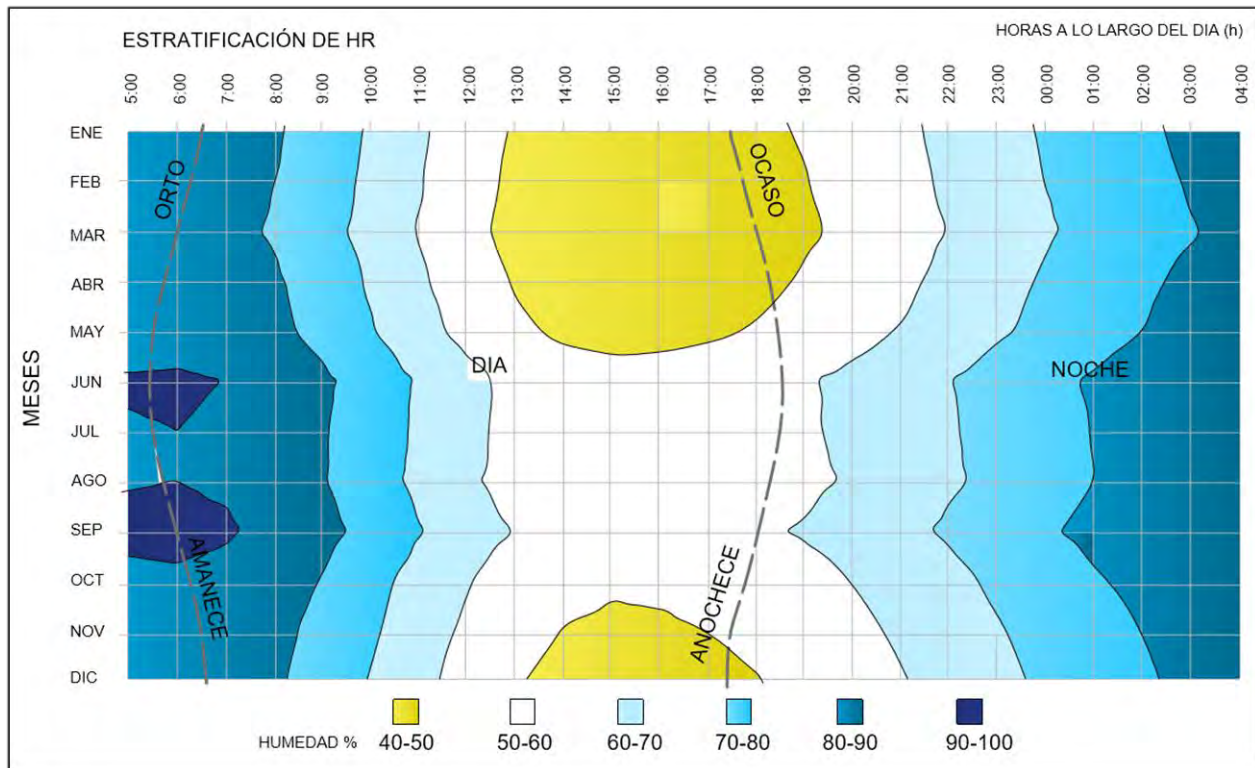


Figura 16. Isohigras, estratificación de la humedad relativa.

En la Figura 16 se muestra claramente cómo es el comportamiento horario de la Humedad Relativa (HR) en nuestra zona de estudio, se puede ver que las noches de todo el año son bastante húmedas alcanzando niveles por arriba del 90% de HR. Esta humedad en el ambiente se prolonga hasta las 8:00hrs del día, en donde la temperatura empieza a subir y la humedad a descender, los horarios matutinos de las 8:00hrs a las 11:00hrs muestran niveles de HR entre los 60 y 80% y de 11:00hrs a 21:00hrs los niveles entran a la zona de confort estando entre los 40 y los 60 %.

3.5 ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN Y EVAPORACIÓN

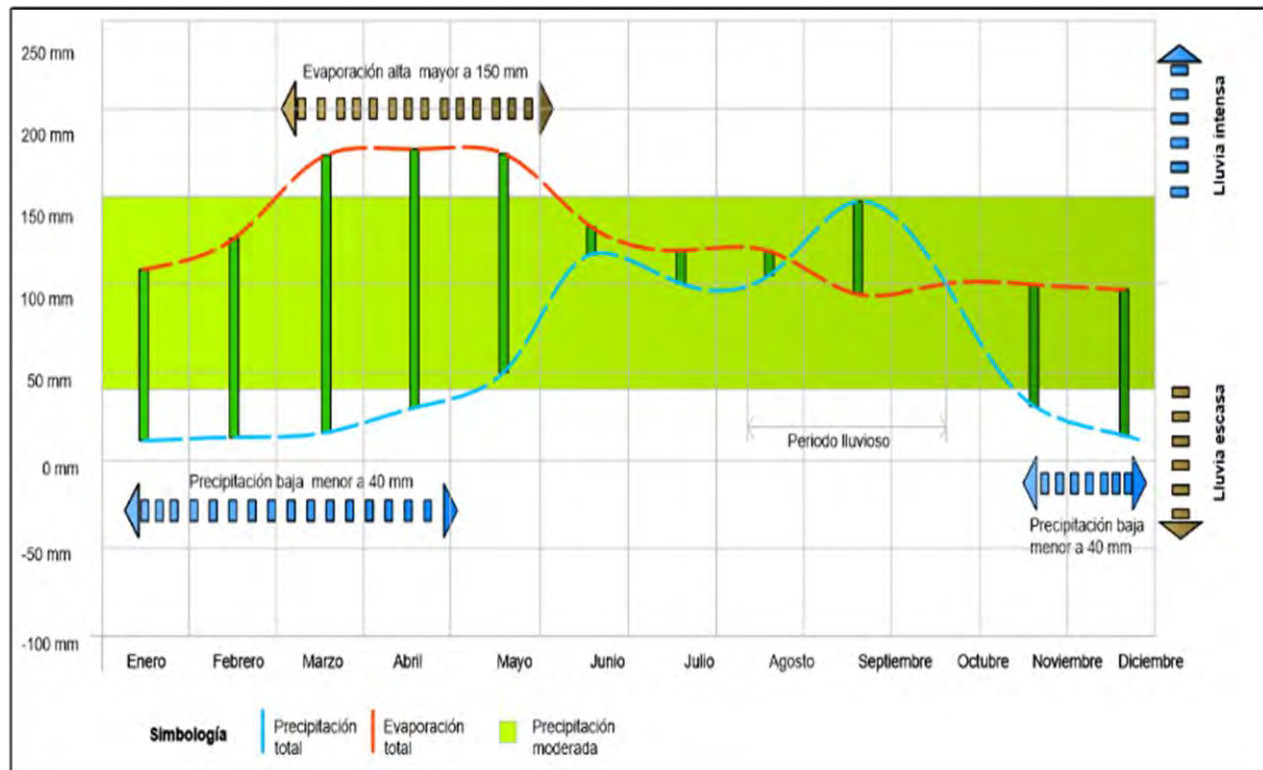


Figura 17. Precipitación y evaporación.

Como podemos ver en la Figura 17, el periodo de precipitación baja inicia en el mes de noviembre y se prolonga hasta el mes de abril con precipitaciones totales mensuales inferiores a los 40mm, a partir de abril se inicia la temporada de lluvias, alcanzando los niveles máximos en el mes de septiembre con un puntaje de 147mm y octubre con 90mm. La comparativa de la evaporación respecto a la lluvia, es mayor en prácticamente todos los meses, exceptuando el mes de agosto donde es menor que la lluvia, esto aunado a que marzo abril y mayo presentan una evaporación mayor a los 150mm hacen que sea una época relativamente seca del año. Es importante mencionar que la precipitación total anual de la localidad es de 728mm, la cual se encuentra en el rango de la bioclimática que indica que es una zona con precipitaciones medias puesto que el rango va de los 650mm a los 1000mm anuales. Las precipitaciones en 24 horas pueden llegar a ser intensas en los meses de agosto y octubre, superando los 246mm en una hora.

3.6 ANÁLISIS DE DÍAS GRADO

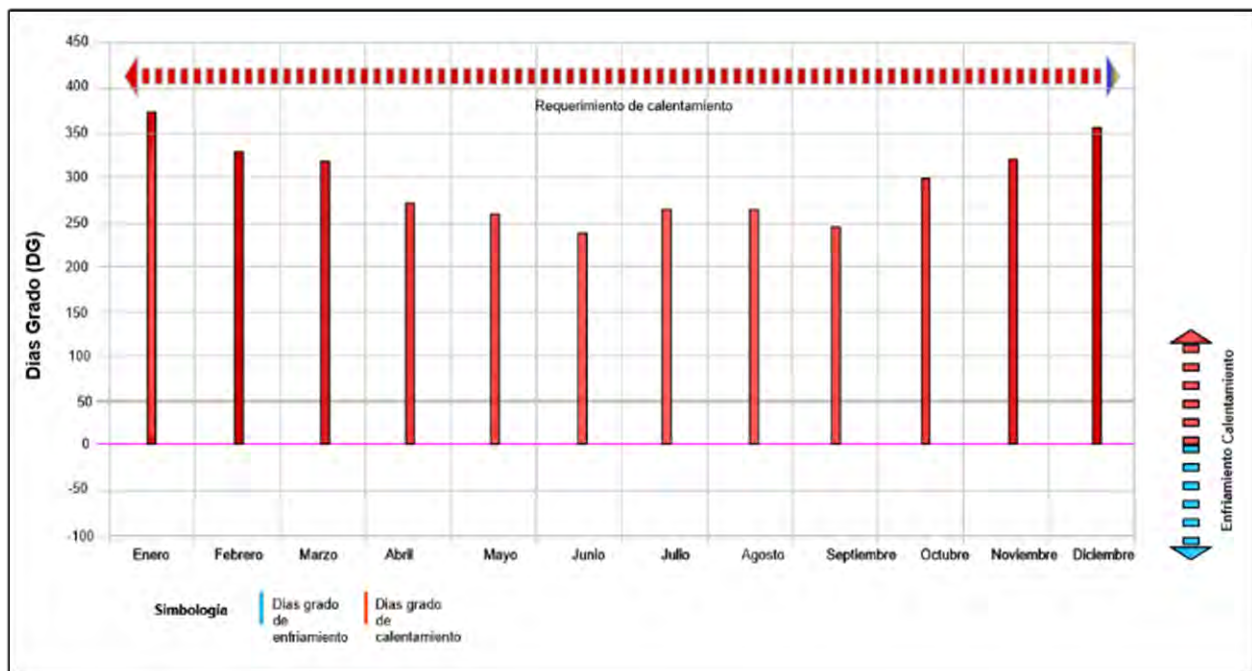


Figura 18. Días grado.

De acuerdo a la Figura 18 de días grado, los requerimientos de calentamiento (DGC) son todo el año, superando los 200 DGC en todos los meses. Podemos observar también que los meses con mayor necesidad de calentamiento son los meses de diciembre y enero, superando los 350 DGC y sumando una cantidad total de 3532 DGC anuales.

3.7 ANÁLISIS DE ÍNDICE OMBROTÉRMICO

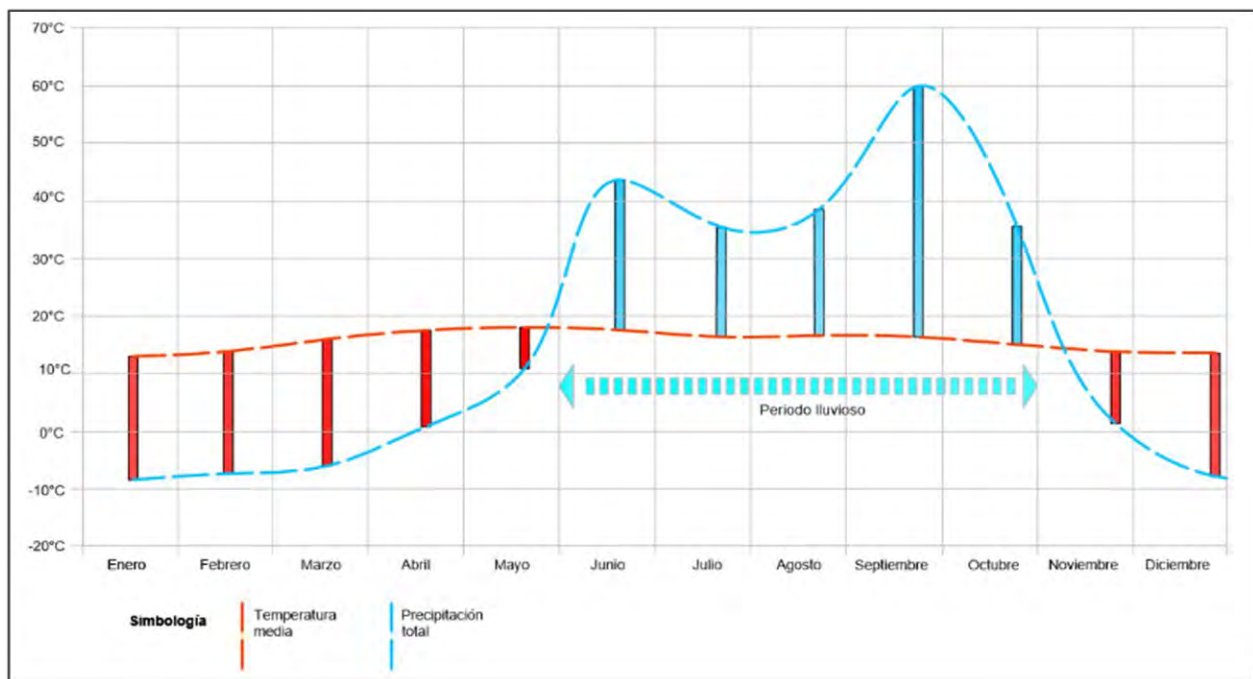


Figura 19. Índice ombrotérmico.

Con la Figura 19 de índice ombrotérmico podemos deducir que la época comprendida en los meses de noviembre a mayo, es considerada como época seca del año, y el periodo lluvioso inicia en el mes de junio prolongándose hasta el mes de octubre.

3.8 ANÁLISIS DE TEMPERATURA EFECTIVA CORREGIDA

Si se toma en cuenta la temperatura máxima de cada mes y la velocidad media del viento correspondiente al mismo mes (Ver Tabla 1), se puede obtener la temperatura efectiva corregida, puesto que se combina la temperatura la humedad y el viento (Ver Figura 20).

$$T_n = 17.6 + 0.31 (T_m \text{ mes más cálido})$$

$$T_n = 17.6 + 0.31 (18.2) \text{ mayo}$$

$$T_n = 17.6 + 5.64$$

$$T_n = 23.2^\circ\text{C}$$

$$Z_c = +2.5^\circ\text{C}$$

$$Z_c \text{ Max} = 25.7^\circ\text{C}$$

$$Z_c \text{ Min} = 20.7^\circ\text{C}$$

Velocidad del viento

0.1 a 1.5 m/s

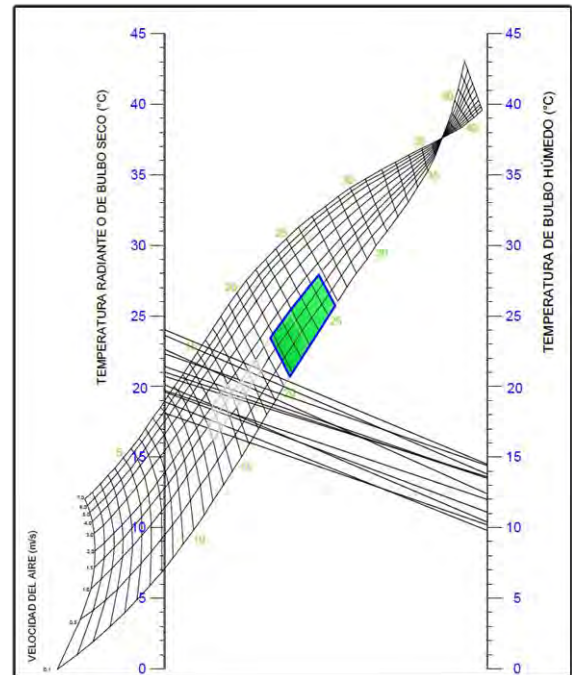


Figura 20. Temperatura efectiva corregida en °C.

Tabla 1. Temperatura efectiva corregida.

Aquixtla Puebla	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura de bulbo seco (TBS) °C (Max)	18.9	20.1	22.6	23.7	24	22.3	21	21.4	20.7	19.7	19.6	18.9
Temperatura de bulbo húmedo (TBH) °C	9.8	10.4	12.4	13.8	14.6	14.4	13.5	13.5	13.6	12	11.1	10.2
Temperatura efectiva corregida (TEC) °C	13.9	14.6	17.2	18.1	18.7	17.3	16.3	16.6	15.6	16	14.1	13.4
Velocidad del aire (VA) m/s	1.3	1.5	1.3	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.6	1.2	1.7	1.2

3.9 RADIACIÓN SOLAR

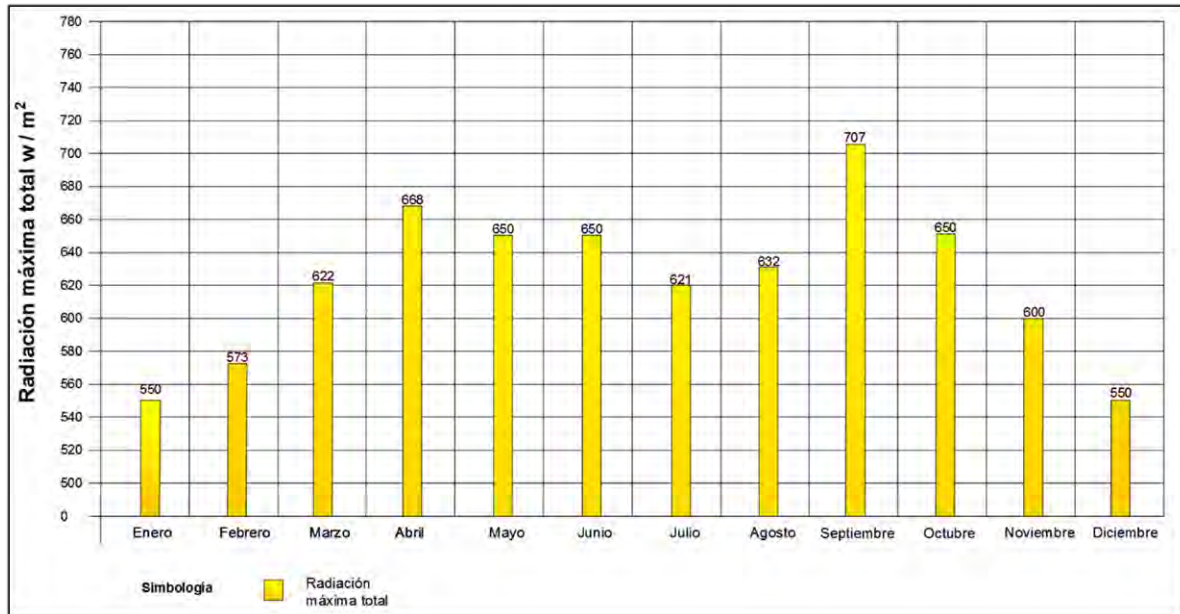


Figura 21. Promedio mensual de radiación máxima total.

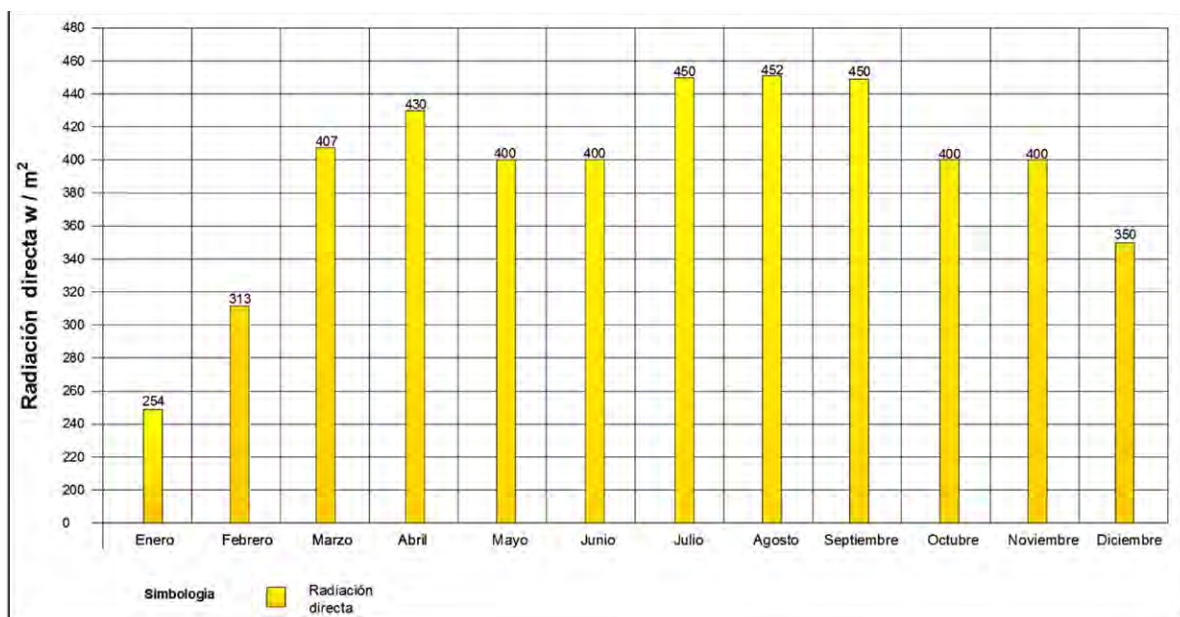


Figura 22. Promedio mensual de radiación total directa.

Como podemos observar en las Figuras 21 y 22, el lugar cuenta con una alta radiación durante casi todo el año, principalmente en abril, mayo y junio, donde esta sobrepasa los $650 W / m^2$, por otra parte, como es de esperarse, dichos niveles bajan durante los meses de lluvia debido a la nubosidad existente y así mismo en los meses de invierno donde la declinación solar afecta directamente a la radiación. Debido a la ubicación geográfica, entre el 19 de mayo y el 24 de julio, el sol está ubicado hacia el norte

3.10 ANÁLISIS DE TRIÁNGULOS DE CONFORT Y ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS

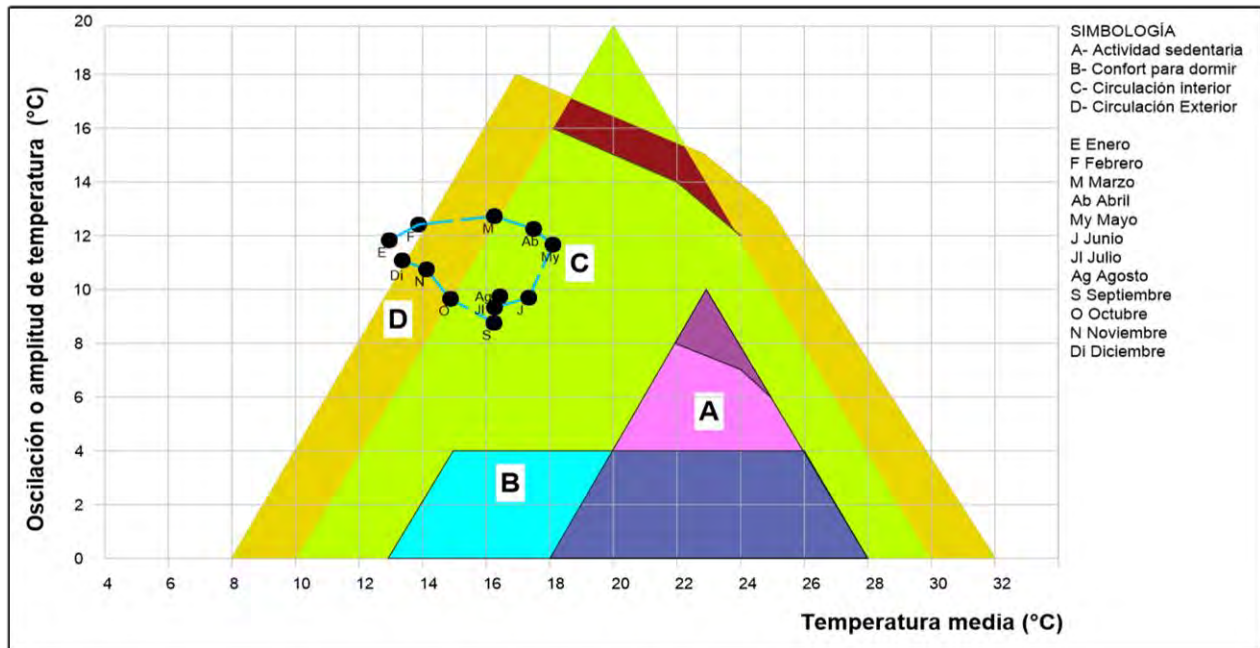


Figura 23. Triangulo de confort, mensual.

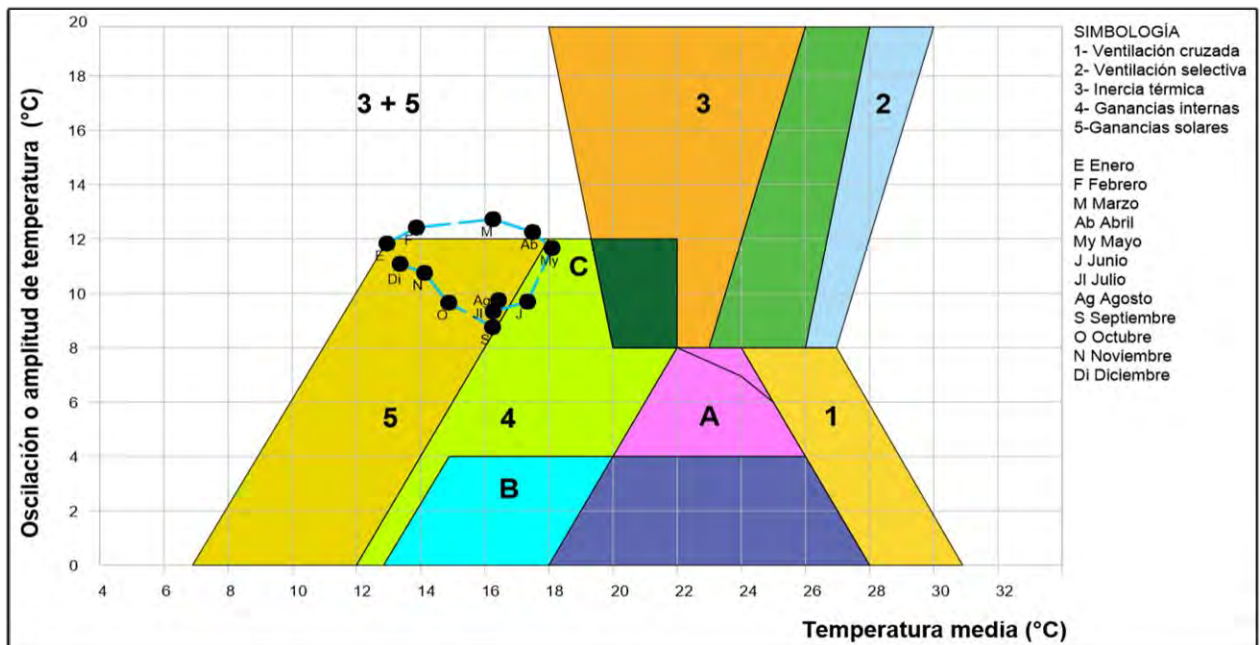


Figura 24. Estrategias bioclimáticas mensuales.

De acuerdo con el triángulo de confort de Evans, profesor investigador en el Centro de Investigación Hábitat y Energía de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de Buenos Aires Argentina, podemos deducir que los meses de diciembre, enero y febrero se encuentran totalmente fuera de la zona de confort, aclarando que dicho triángulo considera la temperatura y la oscilación térmica para su análisis (Ver Figura 23). También podemos ver que los meses de marzo, octubre y noviembre muestran condiciones adecuadas para circulación exterior y el resto de los meses para circulación interior solamente, por lo tanto, dichos resultados nos llevan a concluir algunas estrategias bioclimáticas (Ver Figura 24).

Para febrero, marzo y abril se requiere inercia térmica y ganancias solares, mayo y junio que son los meses de mayores temperaturas basta con ganancias internas y los meses que van de julio a enero las ganancias solares son muy importantes para alcanzar niveles de confort en temperatura.

3.11 TABLAS DE MAHONEY (DETERMINACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS)

Las tablas de Mahoney son un instrumento muy importante dentro del análisis climático y la determinación de las estrategias bioclimáticas, diseñadas por Carl Mahoney, arquitecto investigador formado en la AASA (Architectural Association School of Architecture) de Londres Reino Unido, su uso y análisis requieren los siguientes datos: temperatura media mensual, humedad relativa media mensual y precipitación media mensual en mm. Con esto, se determinan los límites de confort y se hace un estimado para dar algunas recomendaciones referentes a las estrategias bioclimáticas esenciales para el caso de estudio en cuestión.

Se muestran a continuación las estrategias que se podrían aplicar para mejorar las condiciones de confort en la localidad de Aquixtla Puebla.

- **Distribución:** Orientación Norte-sur, eje largo este- oeste
- **Espaciamiento:** Configuración compacta
- **Ventilación:** Locales de doble galera, ventilación temporal.
- **Tamaño de aberturas:** Pequeñas (20% - 30 %)
- **Posición de aberturas:** En muros N y S, a la altura de los ocupantes en barlovento
- **Protección de aberturas:** Sombreado total y permanente.
- **Muros y pisos:** Masivos (arriba de 8hrs de retardo térmico)
- **Techumbre:** Masiva (arriba de 8hrs de retardo térmico)

CAPÍTULO 4

LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS



4 CAPÍTULO 4 LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

4.1 SISTEMA CONSTRUCTIVO 1; MUROS DE TIERRA CRUDA COMPACTADA

La tierra es un material de construcción que ha sido utilizado en diversas regiones del planeta por miles de años. En la actualidad más del 50% de las viviendas del mundo están construidas con este material. La utilización de la tierra representa una alternativa viable para ayudar a solucionar el problema del déficit habitacional, situación que afecta sobre todo a países en vías de desarrollo. A lo largo de la historia la tierra se ha utilizado con distintas técnicas, “Incluso en las Sagradas Escrituras podemos encontrar referencias a estas técnicas, sobre todo al adobe”. (Monjo Carrió, 2014)

Distintas son las maneras en que el hombre ha utilizado los recursos naturales para proveerse de un techo, pero ahora nos centraremos en lo que comúnmente podría llamarse tapial, que muchos autores lo han confundido etimológicamente hablando con la tapia, la diferencia radica en que la tapia es, según la enciclopedia Espasa-Calpe “cada uno de los trozos de pared que de una sola vez se hacen con tierra amasada y apisonada en una horma” (Ver Figuras 25 y 26). Y de la misma fuente podemos ver que tapial es, “conjunto de dos tableros que, sujetos con los costales y las agujas, se colocan verticales y paralelos para formar el molde en que se hacen las tapias”. (ESPASA, 1993)

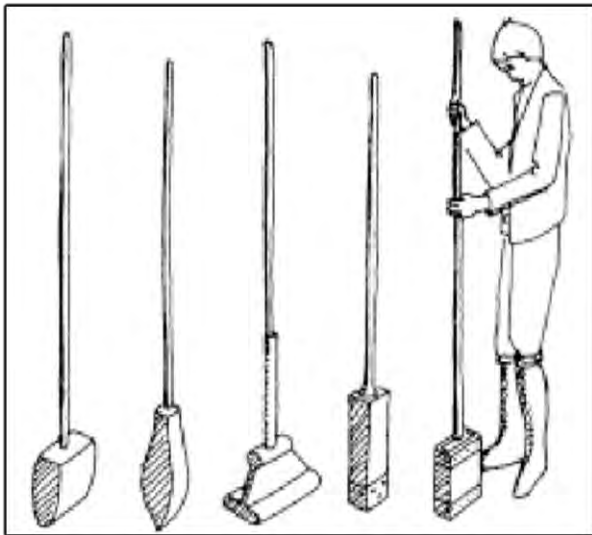


Figura 25. Pisones utilizados para compactación manual (Minke 2001).

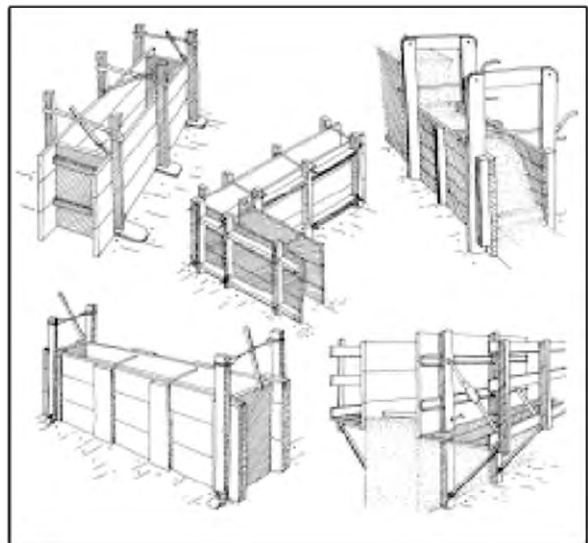


Figura 26. Encofrado para Tapial (Minke 2001).

Existen muchas y variadas formas de ocupar la tierra cruda compactada para la realización de los muros, sin embargo las características óptimas de la tierra para que un muro de tierra cruda compactada cumpla de manera eficaz su función se basa principalmente en los compuestos de la misma, estos son; el grado

de adherencia de la tierra, la cantidad de arcilla, la cantidad de arenas y algo muy importante, que la tierra esté libre de raíces, piedras o elementos como paja y vegetación, esta última podría sufrir su descomposición natural y dejar huecos en los muros, facilitando así su desmoronamiento, (Ver Figura 27).

En la actualidad, “aproximadamente un tercio de la población de nuestro planeta vive en construcciones de tierra, lo que demuestra una clara vocación por utilizar este material en la producción de viviendas”. (Vieira Hoffmann, Negrini Minto, & Falleiros Heise, 2011)



Figura 27. Vivienda construida con tierra en Marruecos. Foto: Imbtba.

4.1.1 Ventajas y desventajas del sistema constructivo

Bastante se ha hablado de que en la actualidad, la construcción ha sido uno de los principales enemigos del medio ambiente, el uso desmedido de los materiales que se emplean en la construcción, su transportación, los métodos empleados para la obtención de los mismos, su ciclo de vida, etcétera, son algunos de los factores que posicionan al constructor como un agente que se ha encargado de provocar un gran deterioro en el medio.

Sin embargo, la construcción con tierra sigue siendo una de las técnicas más utilizadas en todo el mundo y de la que como cualquier sistema constructivo tradicional, se tienen ventajas y desventajas, tanto constructivas como termo-físicas.

4.1.2 Ventajas:

- El sistema constructivo de tapial con tierra cruda compactada es muy económico puesto que la materia prima utilizada se puede tomar del mismo sitio donde se planea construir, evitando así el gasto de transportación, compra y almacenaje del material.
- Por su poca complejidad técnica, es un sistema que no requiere mano de obra especializada, lo puede hacer cualquier persona con conocimientos básicos de construcción.
- Es un sistema constructivo con un fuerte potencial ecológico, puesto que no existe gasto energético de transportación, no requiere un método industrializado y al finalizar su ciclo de vida, se reincorpora en un 100% al mismo suelo, es un sistema constructivo ecológico de bajo impacto en el medio.
- Debido a las propiedades termo-físicas de la tierra, lo hace un sistema constructivo que reduce en gran medida el gasto energético ocupado en la calefacción de los espacios.
- Es un sistema constructivo que se puede emplear en prácticamente todo el mundo, estabilizando la tierra en regiones donde se requiera, se pueden obtener excelentes resultados en su uso, la estabilización de la tierra consiste en agregar algún complemento natural como la arcilla o el óxido de calcio para mejorar el grado de estabilidad de la misma.
- Se pueden hacer diseños muy flexibles con la tierra, dependiendo del ingenio del constructor y de su creatividad es como se podría llegar a resultados bastante interesantes.
- Con un poco más de técnica, el sistema constructivo permite hacer modulaciones resistentes a los sismos.
- El sistema permite la transpiración de los muros hacia el exterior, estabilizando la temperatura interior a través de la humedad exterior.
- Es un sistema con fuerte potencial para poder ser aplicado en la vivienda de interés social de bajo presupuesto, dotando a las personas de una vivienda económica, fácil de construir, con bajo impacto ambiental y excelentes condiciones térmicas.

4.1.3 Desventajas:

- En lugares propensos a sismos y temblores, se requiere hacer un diseño que responda adecuadamente, teniendo claro que la tapia ofrece poca resistencia a esfuerzos de flexión y tracción.
- Debido a su estructura portante, los muros generalmente requieren más espacio debido a que son de dimensiones mayores en cuanto al espesor respecto a otros sistemas constructivos.
- Tiene restricciones estructurales, de manera común restricción en las alturas de los edificios.

4.1.4 Referentes en México



Figura 28. Zona arqueológica de Paquimé, Casas Grandes Chihuahua.

Son bastantes los lugares en donde se intenta atribuir el origen de la construcción con tierra vertida compactada, a nivel mundial se cree que el medio oriente es el pionero en desarrollar dicha técnica y posteriormente se inició su expansión hacia todo el mundo. Sin embargo, este es un paradigma que para efectos de esta investigación no toma relevancia alguna.

En México, principalmente en la zona norte de Chihuahua, en el Municipio de Casas Grandes, se conservan vestigios de una ciudad antigua conocida como Paquimé (Figura 28), que data del siglo XII, Paquimé fue construida con enormes muros de tierra cruda moldeada que hasta la fecha, después de nueve siglos sigue conservando su traza original.

Actualmente, existen varias instituciones y organismos preocupados por el diseño sustentable, el uso de materiales alternativos para la construcción y prácticas de diseño bioclimático con la finalidad de reducir el impacto que la construcción tiene sobre el medio ambiente y la enorme huella ecológica que se tiene. Es el caso de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, en la que un grupo de investigadores dirigida por el Dr. Luis Fernando Guerrero Baca están realizando proyectos en los que se contempla la caracterización del sistema constructivo de tierra vertida compactada y su aplicación como sistema constructivo alterno.

También existen organizaciones como Proyecto San Isidro educación permanente S.C. en el estado de Tlaxcala, en donde la Arquitecta Alejandra Caballero, fundadora y directora de la Sociedad Civil desarrolla proyectos donde se integran alternativas de construcción en las que la tierra vertida compactada es empleada como la materia prima principal, (Ver Figura 29).



Figura 29. Construcción de una casa de TVC diseñada por la Arq. Alejandra Caballero, Tlaxcala, México. (Foto: L. Guerrero)

Por otro lado, arquitectos como Tatiana Bilbao, han ocupado la tierra vertida compactada para crear escenarios arquitectónicos en los que la sensibilidad por la naturaleza juega un papel importante en su obra.

Consciente de las propiedades térmicas del sistema constructivo y de sus propiedades mecánicas, Tatiana propone un sistema de tierra vertida compactada, en el que estabiliza la tierra con algunos aditivos tipo cemento, creando un espacio que además de ser un lugar agradable que muestra los muros de tierra compactada aparente, permite el intercambio de humedad con el exterior a través de la porosidad de la tierra, (Ver Figura 30).



Figura 30. Casa Ajijic, en Chapala Jalisco México, diseño de Tatiana Bilbao S.C. (Foto: T. Bilbao).

4.2 REFERENTES EN EL MUNDO

La región de los estados Árabes alberga una de las ciudades antiguas con mayor influencia en las construcciones con tierra cruda compacta a nivel mundial, hablamos de la ciudad de Shibam en el país de Yemen, (Ver Figura 31,32, 33 y 34). Ciudad amurallada con más de 1700 años de antigüedad y una ciudad que fue centro comercial del medio oriente en siglo XVI, cuenta con construcciones verticales que llegan a medir 40 metros de altura en edificios de hasta 16 plantas, por tales cualidades es muy conocida en la actualidad como “el Manhattan del desierto”. La ciudad antigua de Shibam fue declarada patrimonio de la



Figura 31. Ciudad vertical amurallada de Shibam en Yemen, construida con tierra cruda compactada (Foto: Khaled Nashar, Peter Pares y Twiga Swala).

humanidad por la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) en el año de 1982, sin embargo en las últimas dos décadas ha sufrido un sinnúmero de ataques causados por las guerras internas que actualmente tienen estos países Árabes.

La ciudad antigua de Chan Chan ubicada en la costa norte de Perú, (Ver Figuras 35, 36 y 37) cerca de la ciudad de Trujillo, es un referente histórico de la construcción con tierra cruda, en esta ciudad antigua que data su construcción entre los años 850 y 1100 d.c. es una ciudad creada principalmente con adobe, muros de 50 cm de espesor con remates redondos y vigas de madera, siguió una traza urbana perfectamente

bien definida, llegó a contar con 20 km² de superficie total, 9 ciudadelas importantes y un sistema de abastecimiento de agua que pocas civilizaciones tenían. Capital de la cultura Chimú, llegó a contar con más de 500 mil personas y es considerada la ciudad de barro más grande del mundo, fue declarada patrimonio cultural de la humanidad por la UNESCO en el año de 1986.



Figura 32. Shibam en Yemen (Foto: Khaled Nashar, Peter Pares y Twiga Swala).



Figura 33. Shibam en Yemen (Foto: Khaled Nashar, Peter Pares y Twiga Swala).



Figura 34. Shibam en Yemen (Foto: Khaled Nashar, Peter Pares y Twiga Swala).



Figura 35. Zona arqueológica de Chan Chan, Perú.
(Foto perteneciente a la UNESCO Autor: Jim Williams
20/02/2007)



Figura 36. Zona arqueológica de Chan Chan, Perú.
(Foto perteneciente a la UNESCO Autor: Jim Williams
20/02/2007)



Figura 37. Zona arqueológica de Chan Chan, Perú. (Foto perteneciente a la UNESCO Autor: Jim Williams (20/02/2007)).

4.3 SISTEMA CONSTRUCTIVO 2. SISTEMA BASE, MUROS DE BLOCK CONVENCIONAL

De acuerdo al censo realizado por INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), realizado en el 2010, las construcciones de vivienda en México han cambiado de una manera significativa de cómo se habían construido 3 o 4 décadas atrás respecto a su resistencia en muros de vivienda. Ahora el 87% de las construcciones para vivienda en México se hace con materiales que para INEGI son resistentes, es decir, clasifica los materiales resistentes y dentro de ellos pone al tabique, el block, la piedra la cantera y el concreto.

Otro dato importante que nos presenta en el censo económico realizado en el año 2009, es que si hipotéticamente en México solo existieran 100 empresas dedicadas al ramo de la construcción; 46 se dedicarían a la construcción de vivienda, 25 a obras relacionadas con el transporte, 11 a obras relacionadas con el petróleo y petroquímica, 6 a obras de electricidad, 5 a otras de agua y de las 7 restantes no estaría definida su actividad. Esto nos deja claro que la industria de la construcción de viviendas en México es la más importante dentro de su campo. Sin embargo, algo que es muy evidente es que la mayor parte de estas construcciones destinadas a la vivienda se hacen con blocks de concreto, tal sistema constructivo vino a reemplazar la construcción de mampostería que se venía desarrollando con adobe y madera principalmente. Debido a sus ventajas económicas sobre otros tipos de mampostería, el block de concreto se ha posicionado en el primer lugar como materia prima de la construcción de vivienda de interés social en México.

El sistema constructivo de muros de mampostería hechos con blocks de concreto es un sistema que requiere sin duda alguna de un elevado gasto energético si lo comparamos con el sistema de Tierra cruda vertida compactada. Primero, se tiene que extraer la piedra volcánica que será triturada en pequeñas dimensiones que van de los 10 a los 35 mm, (a este producto se le conoce como confitillo), lo cual genera un gasto energético de transportación y triturado, adicionalmente el consumo energético que genera la producción de cemento Portland, que será el aditivo que confine los agregados para formar el block en el molde y aunado a esto la cantidad de agua utilizada en la fabricación de los blocks y su curado posterior a la fabricación.

Existen variadas proporciones para la fabricación de los bloques de concreto u hormigón como algunos lo llaman, la más citada y utilizada es 1:5:2, cemento, arena y piedra fina, se mezcla todo con un 9% de agua para crear una mezcla homogénea y poder verterla en el molde que ya deberá estar limpio. Este 9% de agua se obtiene de la relación del peso total de los materiales en estado seco. Posterior a su vaciado en los moldes, los bloques deben ser curados con agua durante 28 días, es muy importante no omitir este paso ni quitarle días de curado a los blocks, ya que la mala práctica del curado repercute directamente en la resistencia de los mismos.

En México, las dimensiones de fabricación para los blocks de concreto son:

- 4", que equivale a 10cm de ancho x 20 cm de alto x 40 cm de largo
- 6", que equivale a 15cm de ancho x 20 cm de alto x 40 cm de largo
- 8", que equivale a 20cm de ancho x 20 cm de alto x 40 cm de largo

4.3.1 Ventajas:

- Por ser un sistema constructivo que supera en dimensiones al tabique rojo y al block hueco, es más rápida su colocación y su rendimiento es mayor económicamente hablando.
- Su almacenamiento es muy práctico debido a su tamaño estandarizado.
- Su acabado es liso, y puede dejarse sin aplanado alguno.
- Siempre será constante su dimensión a la hora de fabricarlos, debido a que siempre se ocupan los mismos moldes.
- Es un sistema con mayores ventajas económicas que algunos otros como el tabique rojo y el block hueco.
- Su colocación no requiere mano de obra calificada, es un sistema muy sencillo de hacer.

4.3.2 Desventajas:

- Tiene un coeficiente de transmisión de calor variable, ya que este lo determinan las proporciones de agregados y no siempre se utilizan las mismas.
- Es un sistema que demanda mucho gasto energético, tal gasto corresponde a su fabricación y al proceso que demanda la fabricación de los agregados.
- Presenta mayores desventajas térmicas respecto al tabique y al sistema de tierra vertida compactada.
- Requiere cerramientos y apoyos verticales hechos con acero y concreto, materiales que por su fabricación demandan enormes cantidades de energía y por tanto una mayor cantidad de gases de efecto invernadero (GEI).

4.4 REFERENTES EN MÉXICO

Sin duda alguna los mayores referentes que se tienen en México respecto a la construcción con block de concreto convencional no son los más reconocidos por su estética, mucho menos por su valor térmico.



Figura 38. Vivienda entregada a una familia de damnificados en la localidad de Parral, Chihuahua.

Sin embargo, la construcción con blocks de concreto ha crecido de una manera desmedida que lo podemos encontrar en variadas construcciones, desde viviendas de interés social, viviendas residenciales, escuelas, estacionamientos, plazas comerciales etc., (Ver Figura 38). Pese al enorme y variado uso que se le ha dado, su uso aparente difícilmente lo vamos a encontrar en edificios exceptuando la vivienda de interés social, que es donde el sistema toma su mayor potencial.

CAPÍTULO 5

MARCO DE REFERENCIA



5 CAPÍTULO 5 MARCO DE REFERENCIA

5.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE TERMODINÁMICA

Es importante hacer un análisis de los distintos conceptos que engloba la termodinámica para poder entender de mejor manera como es el comportamiento de la energía calorífica en los sistemas constructivos y como se relaciona tal energía con los demás factores que intervienen en la transferencia de calor hacia el interior de los espacios.

La Termodinámica estudia el intercambio de energía en sus diversas formas, su interacción con los equipos, las propiedades de la materia y el uso racional de la energía. (Rodríguez, Jorge A., 2016)

Así, siendo la termodinámica una materia que influye en todas las ramas y materias de ingeniería, desarrollaremos cada uno de los conceptos que están implícitos en la arquitectura y en el desarrollo experimental de esta investigación.

Lo primero que abordaremos son los distintos mecanismos de transferencia de calor en la materia, ya que este fenómeno de transferencia de calor es el responsable de que el clima y condiciones exteriores influyan en la temperatura de los espacios interiores a través de cómo esta transferencia de energía actúa sobre la envolvente del edificio.

5.2 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

5.2.1 Conducción

El mecanismo de transferencia de calor por conducción es uno de los medios de transferencia que se enfoca principalmente en el proceso de transferencia de calor en los objetos sólidos, puesto que en los fluidos intervienen otro tipo de elementos como lo es la convección, calcular las características de la energía es más complejo que en el método de transferencia por conducción, en donde el calor se transfiere debido a la dilatación de las moléculas del material

“En todos los procesos de transporte (flujo de calor, electricidad, fluidos, etc.) se encuentra que la cantidad de lo que fluye es directamente proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a la resistencia”. (Rodríguez, Jorge A., 2016)

La diferencia de potencial es la diferencia de temperatura entre los dos cuerpos y la resistencia se debe a la rigidez de las moléculas de los cuerpos que obstaculizan la vibración o a presencia de huecos en el material.

En el año de 1822, el físico Francés Jean Baptiste Joseph Fourier, estudió los fenómenos de transferencia de calor y determinó su ecuación que calcula la intensidad de flujo en la conducción.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = k A \frac{\partial T}{\partial x}$$

Donde:

Q = Calor transmitido por conducción

x = Espesor del material

A = Área normal del flujo calórico

K = Conductividad térmica del material

r = Tiempo

T = Temperatura

En forma abreviada, se usa la siguiente notación:

$$q = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

De este modo la ecuación queda así:

Fórmula 1. Conducción

$$q = k A \frac{\partial Q}{\partial t}$$

Para el análisis del flujo de calor se cuenta con dos tipos de régimen,

- 1.- Si el valor de q (Cantidad de calor) es constante el régimen es estable, estacionario o permanente.
- 2.- Si el valor de q (Cantidad de calor) es variable con el tiempo, el régimen es transitorio.

Las bases para definir el tipo de régimen de flujo de calor están determinadas por tres factores; la conductividad térmica del material, el área disponible para el flujo y el gradiente térmico.

5.2.2 Convección

El mecanismo de transferencia de calor que actúa por medio de la convección se basa principalmente en la creación de corrientes en el seno de un fluido, tales corrientes producidas en el seno del fluido se deben a dos orígenes:

- 1.- Natural, cuando las corrientes son causadas por diferencias de energía potencial
- 2.- Artificial o forzada, cuando las corrientes se originan en diferencias de energía cinética (elemento impulsor como una bomba o ventilador).

En el caso número uno se dice que la convección es natural y en el segundo que hay convección forzada.

Un concepto importante para este apartado es la “transmisión de calor sensible”, se denomina de esta manera a cualquier proceso en el que el fluido utilizado para calentar o enfriar no experimenta cambio de fase.

Régimen de flujo

El termino de régimen de flujo se atribuye a la manera en cómo se mueve el fluido;

- 1.- Flujo laminar; en el que el flujo del fluido corresponde a una sola línea muy ordenada, a velocidad constante y con un mismo rumbo fijo.
- 2.- Flujo turbulento, en que las diferencias de velocidad hacen del flujo un torbellino o torbellinos irregulares.

Para el análisis de este mecanismo es preciso indagar en un término denominado coeficiente de película, porque tenemos claro que la convección que actúa sobre cualquier cuerpo, aunque este sea de mayor o menor capacidad de conducción, la capa laminar que se presenta hacia el exterior del cuerpo a analizar es la que ofrece mayor o menor resistencia a la transferencia de calor dentro del mecanismo.

Si analizamos un modelo físico desde el punto de vista de la conducción a través de la capa laminar y si aplicamos la ecuación de Fourier a la capa de fluido es:

Fórmula 2. Coeficiente de película de un fluido

$$\frac{Q}{A} = k \frac{dT}{dx} = \frac{k}{dx} dT = h dT \rightarrow Q = h A dT$$

Las unidades de h son:

$$(h) = \frac{(Energía)}{(Superficie)(Tiempo)(Temperatura)} = \frac{(Potencia)}{(Superficie)(Temperatura)}$$

Se denomina h , al coeficiente de película del fluido. Se debe evaluar individualmente para cada situación por las siguientes razones:

- 1.- El valor del coeficiente de conducción k depende del fluido y de la temperatura media de la capa laminar, que a su vez depende de su espesor.
- 2.- El espesor de la capa laminar es extremadamente difícil de estimar.

Este espesor depende de múltiples factores; depende de la viscosidad del fluido, de la velocidad del mismo, de la rugosidad de la superficie, de su disposición geométrica, de la dirección en la que corre el fluido etc.

5.2.3 Radiación

Se entiende por radiación a la energía que no requiere de ningún medio para su propagación. (Rodríguez, Jorge A., 2016)

Entonces, el tipo de energía propagada a través de este mecanismo de transferencia de calor se da en forma de ondas electromagnéticas. Y dependiendo del grado de temperatura propagada es su posición de las ondas dentro del espectro magnético, es decir, la energía propagada por elementos que relativamente lo hacen con poca temperatura como el cuerpo humano, se encuentran dentro de la zona infrarroja del espectro electromagnético y los cuerpos con altas temperaturas se enriquecen en una proporción creciente de ultravioleta.

A manera de simplificar el proceso que implica el mecanismo de transferencia de calor por radiación y que su aplicación a efectos reales de transferencia de calor sea más práctica se hacen los siguientes ajustes:

- 1.- Se supone que la superficie radiante se encuentra a una temperatura uniforme, o sea que las temperaturas son idénticas en todos los puntos de la superficie.
- 2.- El porcentaje de energía absorbida por el medio gaseoso que limita con la superficie es mínimo, y se desprecia.

El físico alemán Max Planck dedujo la ecuación que permite calcular la intensidad de radiación que emite un cuerpo a una longitud de onda.

Se usa normalmente en los cálculos de radiación, los valores más utilizados son:

Fórmula 3. Radiación

$$\sigma = 4.92 \times 10^{-8} \text{ Kcal} / (^{\circ}\text{K}^4 \text{ m}^2)$$

$$\sigma = 0.173 \times 10^{-8} \text{ Btu} / (^{\circ}\text{R}^4 \text{ pie}^2)$$

5.3 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

¿Por qué es importante conocer las propiedades térmicas de los materiales?

Por “Propiedad térmica” se entiende la respuesta de un material a la aplicación de calor. (Sears Francis, Zemansky Mark, Young Hugh, & Freedman Roger, 2004)

Por lo tanto, el estudiar el comportamiento de los materiales de los diferentes sistemas constructivos nos ayudará a saber cuál es el comportamiento que estos tendrán al estar expuestos a ciertas condiciones climáticas.

5.3.1 Densidad

La densidad de los materiales es muy importante en el estudio de la termodinámica, la cual está definida como su masa del material por la unidad de volumen. Es decir, las masas de los átomos y el espaciado entre ellos en las moléculas o los cristales determinan la densidad de los materiales. Se puede decir también que es una medida de compactación de la materia, de cuanta masa está concentrada en un espacio dado y esto hace que los materiales sean más ligeros o pesados de acuerdo a su densidad, (Ver Tabla 2).

Se usará la letra griega ρ (ro) para indicar el símbolo de densidad, entonces tenemos que:

$\rho = m/V$ Densidad es igual a masa sobre unidad de volumen.

La unidad de medida de la densidad dentro del SI (Sistema Internacional de Medidas) es el kilogramo por metro cúbico (1 kg/m^3). Aunque también lo podemos encontrar como (1 g/cm^3)

El factor de conversión quedaría de la siguiente manera:

Fórmula 4. Densidad

$$\text{g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Tabla 2. Densidades de algunos materiales, Sears, Francis W., Zemansky, Mark W., Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. (2004).

Material	Densidad kg/m ³
Poli estireno expandido	0.03 kg/m ³
Madera de pino	0.60 kg/m ³
Aire (1 atm, 20°C)	1.20 kg/m ³
Tabla roca	0.90 x 10 ³ kg/m ³
Hielo	0.92 x 10 ³ kg/m ³
Agua	1.0 x 10 ³ kg/m ³
Agua de mar	1.03 x 10 ³ kg/m ³
Sangre	1.06 x 10 ³ kg/m ³
Glicerina	1.26 x 10 ³ kg/m ³
Adobe	1.6 x 10 ³ kg/m ³
Concreto	2.0 x 10 ³ kg/m ³
Tierra vegetal	1.8 x 10 ³ kg/m ³
Aluminio	2.0 x 10 ³ kg/m ³
Vidrio	2.5 x 10 ³ kg/m ³
Hierro, acero	7.8 x 10 ³ kg/m ³
Latón	8.6 x 10 ³ kg/m ³
Cobre	8.9 x 10 ³ kg/m ³
Plata	10.5 x 10 ³ kg/m ³
Plomo	11.3 x 10 ³ kg/m ³
Mercurio	13.36 x 10 ³ kg/m ³
Oro	19.3 x 10 ³ kg/m ³
Platino	21.4 x 10 ³ kg/m ³

5.3.2 Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad de transporte de los materiales, pues indica la rapidez con la que un material transporta la energía a través de sus partículas, en este caso nos referimos a la capacidad para transportar energía calorífica. En los materiales en estado sólido ese transporte se hace a través de los electrones libres y en el caso de los fluidos el transporte ocurre por movimiento molecular.

Como ya se había visto en líneas anteriores, fue Fourier quien realizó múltiples experimentos para poder determinar una fórmula que nos ayudara a determinar la conductividad térmica de los materiales.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = k A \frac{\partial T}{\partial x}$$

Donde:

Q = Calor transmitido por conducción

x = Espesor del material

A = Área normal del flujo calórico

K = Conductividad térmica del material

r = Tiempo

T = Temperatura

En forma abreviada, se usa la siguiente notación:

$$q = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

De este modo la ecuación queda así:

Fórmula 5. Conductividad

$$q = k A \frac{\partial Q}{\partial t}$$

De acuerdo a esto, los materiales que tienen una gran cantidad de Conductividad térmica son por naturaleza buenos conductores de calor y por el lado contrario, un material con una baja conductividad térmica es un mal conductor de energía calorífica. De manera general, podemos definir que los mejores conductores de energía son los metales si los comparamos con los no metales y los gases en definitivo son malos conductores de energía, (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Conductividad térmica de algunos materiales.

Material	Conductividad W/m °C
Adobe	0.58
Azulejo o baldosa	0.84
Aplanado ligero	0.16
Block cemento-arena	0.99
Block concreto medio	0.51
Concreto	1.50
Cubierta metálica	50
Encalado	0.81
Losa de concreto	1.13
Mortero cemento-arena	0.63
Mortero con arcilla expandida	.025
Pintura	0.26
Tabique	0.96
Tabla roca	0.16
Vidrio sencillo	1.10
Yeso	0.46
Acero inoxidable	24
Aluminio	236
Cobre	384
Hierro	78
Plata	407

5.3.3 Resistividad térmica (Valor R)

Por otro lado la resistividad es el inverso de la conductividad, es decir, representa la capacidad de un material para resistir el flujo de calor. Se expresa en metro grado Celsius por Watt ($\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{W}$).

De acuerdo a los dos términos anteriores podemos poner un ejemplo para poder entender esta relación de conductividad y resistividad térmica;

El acero, es un material de elevada conductividad ($47 \text{ W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$) y baja resistividad ($0.02 \text{ m}^{\circ}\text{C}/\text{W}$), mientras que el poli estireno expandido tiene una conductividad muy baja ($0.035 \text{ W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$) y una resistividad alta ($28.5 \text{ m}^{\circ}\text{C}/\text{W}$). (Ando Ashijara, 2015)

Así, una barrera que está compuesta de varias capas tiene varias resistencias térmicas, el aumento de la longitud física de un elemento resistente aumenta la resistencia de forma lineal, el doble de grosor de una capa significa la mitad del flujo de calor y el doble de valor R.

En la Tabla 4 se muestra la resistividad térmica de algunos materiales.

Tabla 4. Resistividad de los materiales, tomada del libro de Fernando Tudela Eco diseño

Material	Resistividad ($10^{-3} \text{ m } ^\circ\text{C/W}$)
Aire	38460
Agua	1720
Hielo	38460
Granito	520
Arena seca	2000
Adobe	1720
Mortero cemento arena	710
Mampostería de tabique ligero	1780
Mediana	1370
Densa	1050
Vidrio	1390
Asfalto	1720
Acero	20
Aluminio	5
Concreto ligero	1390
Medio	830
Denso	670
Madera	7140
Triplay	7140
Lana mineral (Fietro)	27030
Poli estireno expandido	30300

5.3.4 Retardo y amortiguamiento térmico

Ya se ha hablado un poco de los sistemas de transferencia de calor, mismos que están presentes en la forma de cómo es que la temperatura de los espacios interiores varía respecto de la temperatura del ambiente exterior.

Los intercambios de calor que se presentan en las construcciones, es decir las ganancias o pérdidas de energía son muy complejas, ya que son múltiples los elementos que afectan dichos intercambios de energía, primero porque la aplicación de calor que el sol nos ofrece para calentar las construcciones no es constante, varía mucho a lo largo de todo el día, además de eso las condiciones que hacen que el calor que se recibe del exterior y se pase hacia el interior depende definitivamente de las propiedades termo-físicas de los materiales de la construcción. Sin embargo se ha tratado de sintetizar la forma en que estos sistemas actúan para poder determinar el comportamiento térmico de los sistemas y así tener una herramienta más para tomar decisiones de diseño bioclimático.

Para poder entender el retardo y amortiguamiento térmico citaremos las palabras del Dr. Víctor Fuentes Freixanet, tal como lo describe nos dice que:

“Si se hace una gráfica de las temperaturas exteriores e interiores diarias, se obtendrán dos curvas sinusoidales similares, pero con crestas desfasadas y amplitud diferente. El desfasamiento horario entre los máximos y mínimos se conoce como retardo térmico, mientras que la relación entre las dos amplitudes se llama amortiguación. Se dice que un material tiene más o menos inercia térmica cuanto mayores o menores son su retardo térmico y amortiguación”.

El retardo térmico se puede determinar de manera aproximada a través de la determinación de la difusividad térmica del material, quedando así la siguiente fórmula:

Fórmula 6. Retardo térmico

$$D = \frac{K}{ce \cdot p}$$

Donde:

D = Difusividad (m^2 / h)

K = Conductividad térmica ($W / m K$)

ce = Calor específico ($Wh / Kg K$)

p = Densidad (Kg / m^3).

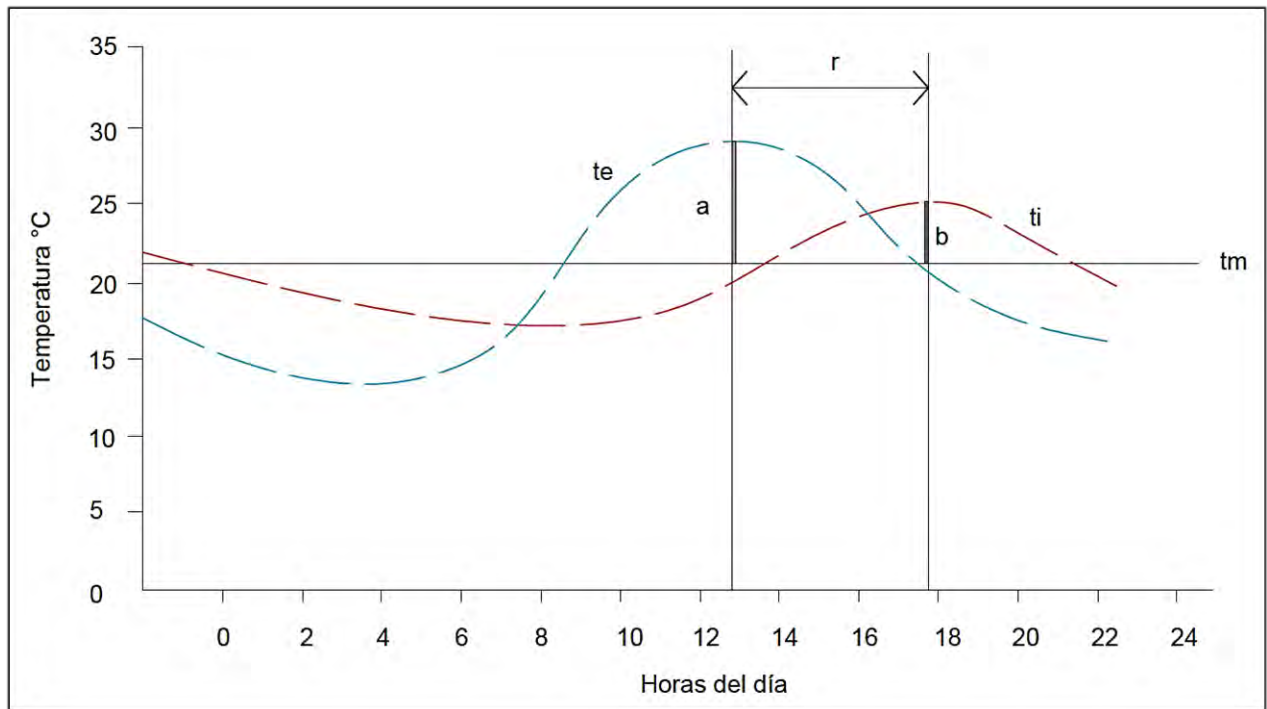


Figura 39. Representación gráfica de la inercia térmica.

r = Retardo térmico

b / a = Amortiguación

t_e = Temperatura exterior

t_i = Temperatura interior

t_m = Temperatura media

De esta forma, el retardo térmico es:

$$\phi = \frac{b}{a} \frac{\sqrt{24}}{\pi * D}$$

Como:

$$\phi = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{24}}{\pi} = 1.382$$

Entonces:

$$\phi = 1.382 * b \frac{\sqrt{t}}{D}$$

Donde:

ϕ = Retardo térmico (h)

b = Espesor del material (m)

D = Difusividad (m^2/h)

Si c_e = calor específico está es J/Kg K, entonces:

$$\phi = 0.02303 * b \frac{\sqrt{t}}{D}$$

5.3.5 Amortiguamiento térmico.

De acuerdo con Steve Szokolay, “Para cualquier edificación se puede suponer que en ausencia de ganancias de calor solar e internas, la temperatura media diaria interior y exterior serán idénticas. La ganancia de calor extra, puede calcularse y promediarse para las 24 horas del día (Q) Esta ganancia provocará un incremento de la temperatura media interior y con ello se presentará un flujo de calor hacia el exterior de la construcción. El incremento de la temperatura media interior se puede determinar por”:
(Szokolay, 1984)

$$\Delta t = \frac{Q}{q}$$

Donde:

q = $q_c + q_v$ (Tasa de pérdidas de calor)

$q_c = \Sigma(A * U)$ (W/K)

$q_v = 0.33 * V * N$ (W/K)

A = área (m²)

U= Transmitancia de cada elemento (W/m² K)

V = Volumen de la habitación (m³)

N = Número de cambios de aire por hora (c/h)

Conociendo el retardo térmico y el factor de amortiguamiento de cada elemento constructivo, la desviación del flujo de calor medio diario (Q) puede calcularse. Esta desviación de la ganancia calorífica con respecto a la media es absorbida por todos los elementos constructivos o es removida por la ventilación.

La admitancia (Y) es una medida de capacidad de absorción de la ganancia de calor perdido de los elementos constructivos, donde la admitancia para un material sólido se puede encontrar por la siguiente fórmula:

Fórmula 7. Amortiguamiento térmico

$$Y = \sqrt{K * \rho * ce * \omega}$$

Donde:

Y = Admitancia del material (W/m² °C)

k = Conductividad térmica (W/m °C)

ce = Calor específico (J/Kg °C)

ρ = Densidad (Kg/m³)

ω = Velocidad angular de la onda de temperatura diurna

$$\omega = 2\pi/24$$

Si el calor específico ce está en J/Kg K, la longitud del día debe expresarse en segundos, así, a partir de la siguiente ecuación se puede deducir Y:

$$Y = 0.0085277 \sqrt{K * \rho * ce}$$

De tal forma la desviación de la temperatura ambiente interior con respecto a la media diaria se puede determinar por:

$$T1 = \frac{Q}{\Sigma(A * Y) + qv}$$

CAPÍTULO 6

PROPIEDADES TÉRMICAS ESTUDIADAS EN ESTA INVESTIGACIÓN



6 CAPÍTULO 6 PROPIEDADES TÉRMICAS ESTUDIADAS EN LA INVESTIGACIÓN

6.1 CALOR ESPECÍFICO

El calor específico de cualquier sustancia se define como la cantidad de calor que se requiere para elevar la temperatura de una unidad de masa de la sustancia en un grado de temperatura.

Esta cantidad de energía que se requiere para modificar la temperatura de una masa dada en materia no es la misma para todos los materiales, por ejemplo, el calor necesario para elevar la temperatura en un grado Centígrado de un kilogramo de agua es 4186 J, pero el calor necesario para elevar la temperatura en 1°C de un kilogramo de cobre es solo 387J.

De los materiales comunes, el agua es el que tiene el mayor calor específico, este valor equivale a casi tres veces el valor que tienen las tierras en general, ($c_{\text{agua}} = 3c_{\text{tierra}}$), lo cual es un importante factor climático sobre la superficie de la tierra, ya que esta es un factor importante en la moderación de la temperatura global, ya que una misma cantidad de radiación solar, eleva tres veces más rápido un cuerpo de tierra que de agua.

En la Tabla 5 se muestra el calor específico de algunos materiales.

Tabla 5. Calor especifico de distintos materiales.

Material	Calor específico J/ Kg °C
Adobe	1480
Azulejo o baldosa	800
Aplanado denso/ ligero	1000
Block de concreto	1000
Concreto	1000
Cubierta metálica	1000
Tabla roca	840
Vidrio sencillo	640
Acero inoxidable	510
Aluminio	877
Cobre	380
Plata	230
Plomo	126
Agua	4190

6.2 INERCIA TÉRMICA

La inercia térmica es una de las propiedades de los materiales que a los constructores bioclimáticos nos interesa conocer, representa la capacidad de un material para acumular energía calorífica para después ser liberada durante un periodo determinado de tiempo. Dicha propiedad depende directamente de la masa térmica del material, del calor específico y del coeficiente de conductividad térmica.

El ciclo de carga y descarga de energía de la inercia térmica puede ser utilizado de manera eficiente en los edificios, adquiriendo y acumulando energía solar durante el día, para ser liberado durante la noche cuando las temperaturas interiores bajan y no hay otra fuente de calor pasiva disponible.

Así los edificios que se diseñen de manera consciente y aplicando las ventajas de la inercia térmica de los materiales, no solo ahorrará energía eléctrica por ahorro en calefacción sino que además se obtiene con ello un mayor confort térmico dentro del edificio.

El nivel de inercia térmica de un material depende de las propiedades siguientes:

Densidad ρ (Kg / m³)

Calor específico C (J/Kg-K)

Conductividad térmica λ (W/m-K)

Espesor del material.

De manera general se puede decir que cuanto mayor sea la densidad, mayor es el nivel de inercia térmica, lo mismo sucede para la capacidad calorífica y el espesor del material, sin embargo, la conductividad térmica debe ser lo suficientemente alta para permitir la transferencia de calor en el material, pero no debe exceder de una cierta conductividad con el fin de lograr el retraso de tiempo deseado para la liberación de la energía calorífica.

El valor de la capacidad interna de calor de los materiales es la forma simplificada de representar el nivel de la inercia térmica disponible dentro de un material por la media de su capacidad para almacenar calor. Se calcula a partir de:

Fórmula 8. Inercia térmica

$$K=10^{-6} \sum_i \rho_i * c_i * d_i$$

Donde:

ρ = es la densidad de la capa i (Kg/m³)

c_i = es el calor específico de la capa i (J/kg K)

d_i = es el espesor de la capa i (mm)

6.3 TEMPERATURA RADIANTE MEDIA.

La temperatura radiante media (MRT) por sus siglas en inglés (Mean Radiant Temperature), “Técnicamente se define como la temperatura radiante uniforme de un recinto negro ideal que produciría, en las personas, las mismas pérdidas o ganancias de calor que el recinto real.” (SOL-ARQ, 2010) El término media indica el promedio del calor radiante emitido por cada una de las superficies por las que está conformado dicho espacio.

Dado que para la obtención de dicha temperatura se han de medir las temperaturas que irradian de cada superficie y uno de los factores que influyen en dicha temperatura son los coeficientes angulares que se forman entre la superficie receptora y el elemento constructivo emisor (muro, plafón o piso), la obtención de esta se vuelve un tanto complicada, sin embargo para su simplificación se ha tomado la temperatura de globo y la velocidad interior del aire para obtener un acercamiento certero de la MRT, quedando la fórmula de la siguiente manera:

Fórmula 9. Temperatura Radiante Media

$$TRM = TG + 1.9 \sqrt{V(TG - TS)}$$

Dónde:

TRM = Temperatura radiante media (°C)

Tg = Temperatura de globo (°C)

Ta = Temperatura seca del aire (°C)

V = Velocidad relativa del aire (m/s)

CAPÍTULO 7

DESARROLLO EXPERIMENTAL



7 CAPÍTULO 7 DESARROLLO EXPERIMENTAL

7.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El diseño experimental para esta investigación se hizo de manera física con el propósito de dar resultados lo más parecido a la realidad, se construyeron dos prototipos de 3m de largo x 3m de ancho y 2.4m de altura (Medidas interiores), para evaluar el comportamiento térmico de un sistema constructivo basado en muros de tierra cruda compactada comparado con otro sistema constructivo convencional utilizado en la región basado en muros de block de concreto industrializado. Ambos prototipos se hicieron con los mismos espesores en muros, mismos espesores en techumbres, mismo volumen interior de aire, puertas y ventanas de igual dimensión y posicionamiento así como el mismo material para ambas, mismo espesor en cristales, la única variable en ambos prototipos es el material de los muros, con esto se hizo una comparación cualitativa y se determinó cuál de los dos sistemas constructivos es el más apto térmicamente para las condiciones climáticas de la región en periodos representativos de bajo y alto calentamiento, aunado a esto se determinó cual es el sistema de menor impacto ambiental y menor huella ecológica.

A continuación se muestra un gráfico que representa la idea de ambos prototipos, (Ver Figura 40). Recordemos que la única diferencia en ambos es el material de los muros, en uno es de Tierra vertida compactada (TVC) y en el otro es de Block de concreto convencional (BCC).

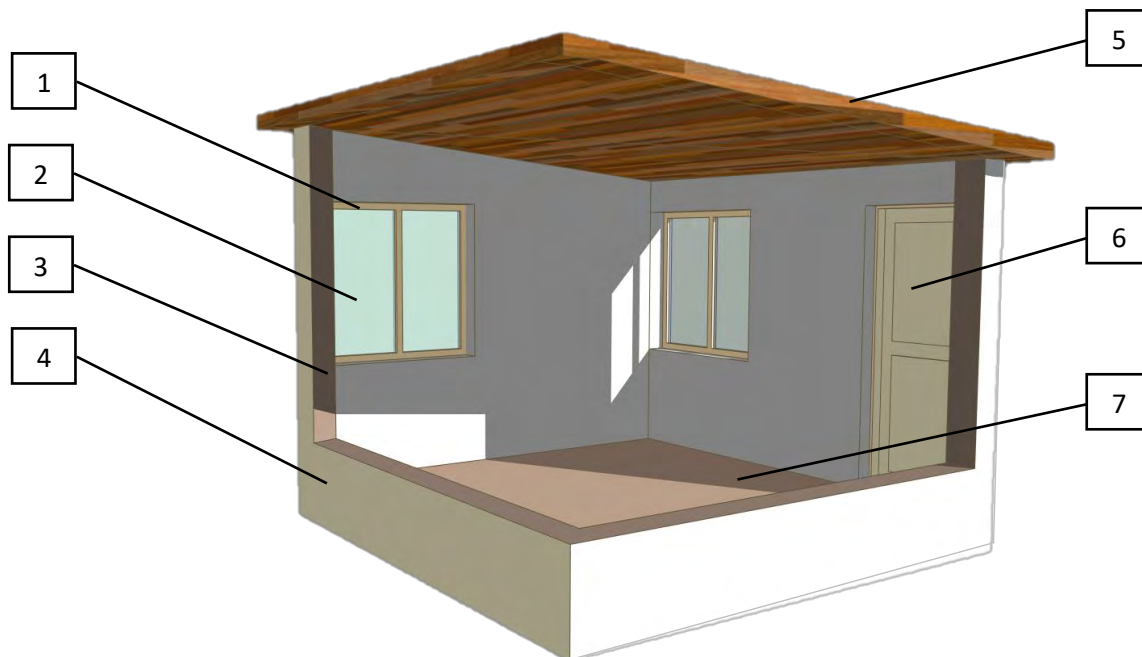


Figura 40. Gráfico del prototipo de tierra cruda compactada.

- 1.- Ventana de madera de pino; marco de 2 cm de espesor con topes para recibir el cristal
- 2.- Cristal claro de 4 mm de espesor para ambas ventanas, medidas de la ventana; 1.5m x 1.5m dividida en dos cristales fijos de 1.5m x 0.75m.
- 3.- **Muros de tierra cruda compactada / Muros de block de concreto convencional, ambos de 21cm de espesor**
- 4.- Repellado de 1cm de espesor hecho con cal, arena y cemento en proporciones 1:1:8 con acabado natural de pintura hecha con cal, baba de nopal, agua y sal, con proporciones; 4 kilos de cal por cada 10 litros de agua, medio kilo de sal y el mucílago de 2 kilos de nopal maduro.
- 5.- Techumbre de 10 cm de espesor hecha con base de madera de pino, 8 cm de tierra cruda compactada, 2 cm de mezcla de cal y arena para la capa final y teja de barro cocido .
- 6.- Puerta de madera de pino, marcos de 4 cm de espesor y tableros de 2 cm de espesor.
- 7.- Piso de tierra natural tepetate. El término tepetate se refiere a un horizonte endurecido, ya sea compactado o cementado, que se encuentra comúnmente en los paisajes volcánicos de México, (Gama Castro, y otros, 2007)

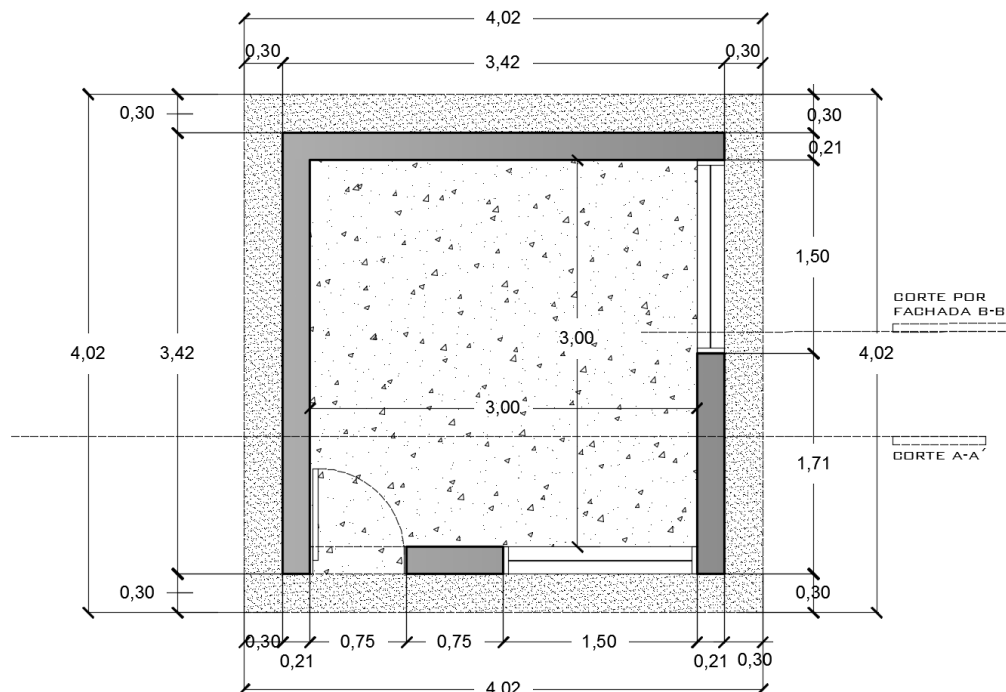


Figura 41. Planta arquitectónica de ambos prototipos.

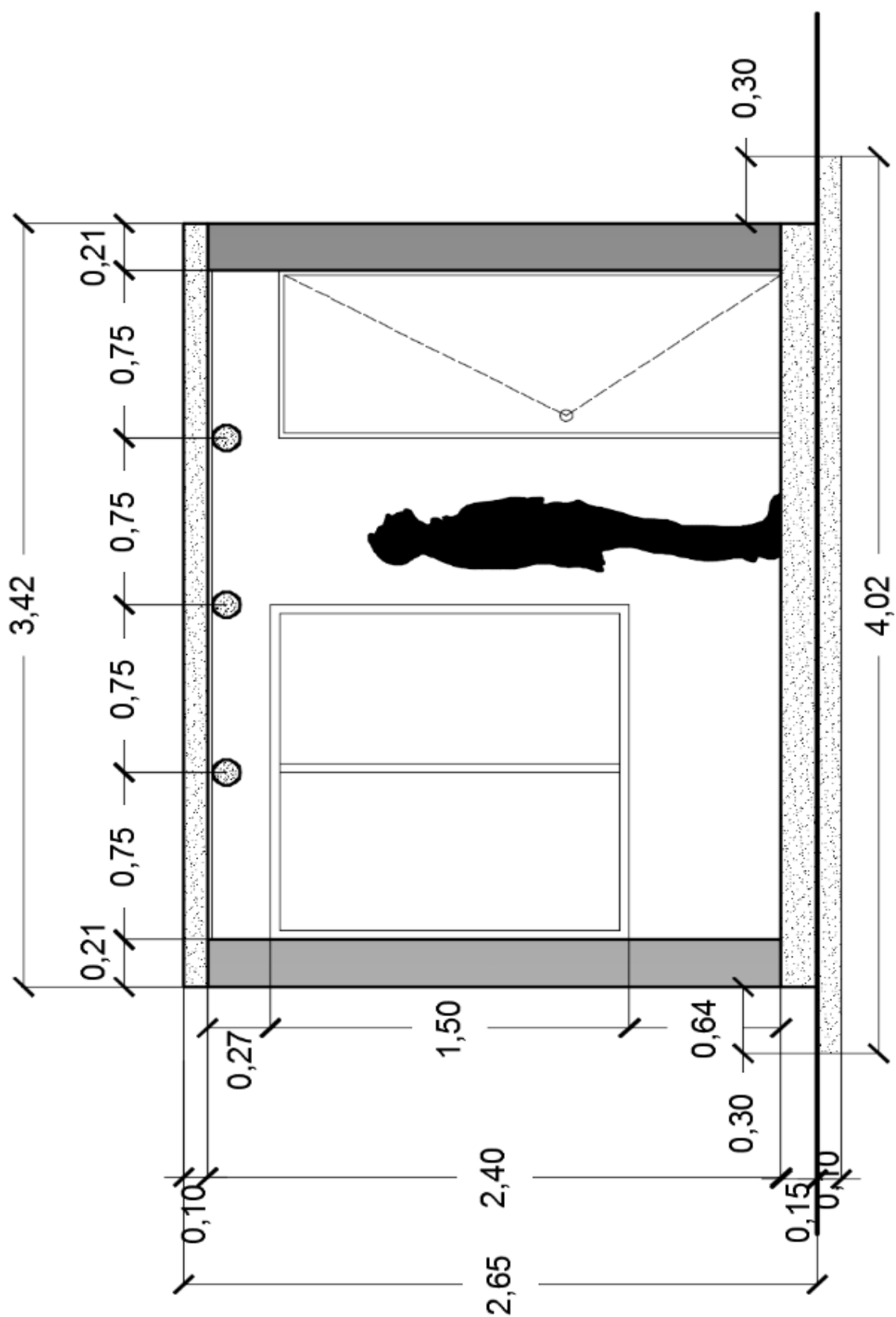


Figura 42. Corte A-A' de ambos prototipos.

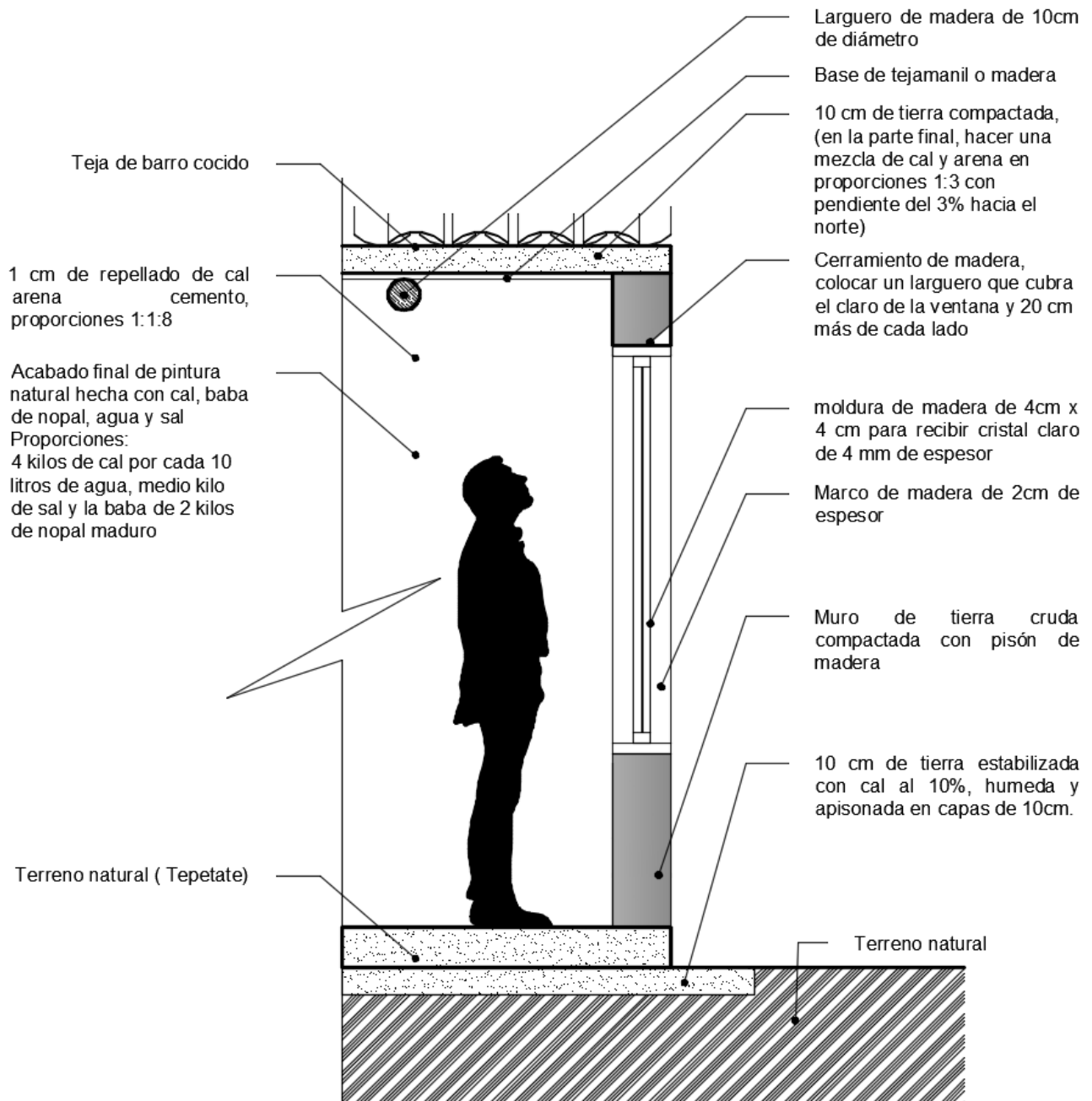


Figura 43. Corte por fachada B-B' de ambos prototipos.

7.2 ANÁLISIS DE ASOLEAMIENTO DE LOS PROTOTIPOS EN EL TERRENO

Para determinar la viabilidad de construir los prototipos en el terreno previsto fue necesario hacer un análisis solar para verificar que el asoleamiento en ambos prototipo se comportara de la manera más semejante posible, esto hará que los datos obtenidos en las mediciones de temperatura al interior de dichos prototipos sea lo más certera posible. (Ver Figura 44 y 45).

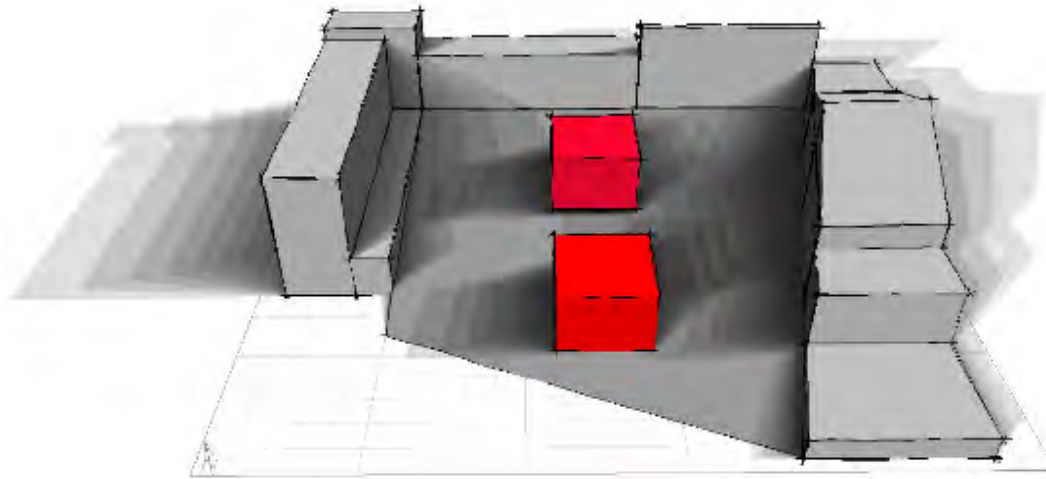


Figura 44. Ubicación de los prototipos en del predio.

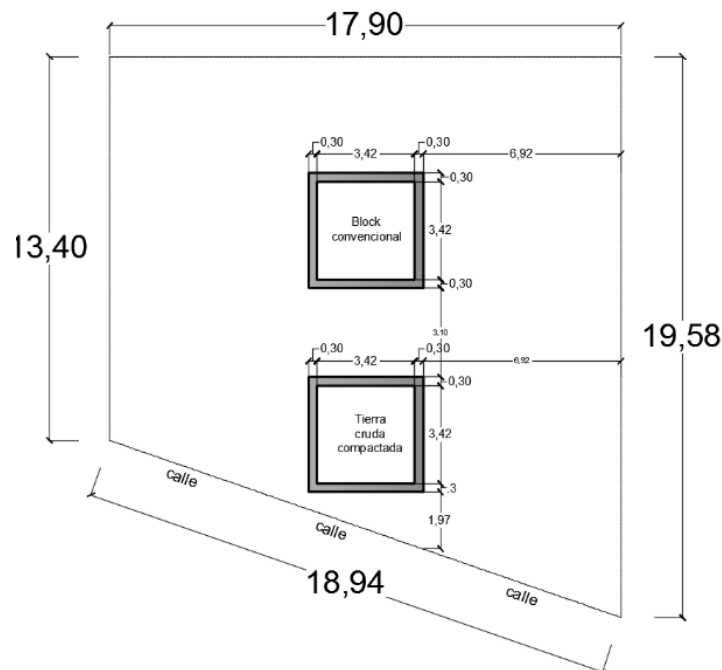


Figura 45. Plano de ubicación de los prototipos dentro del predio.

Análisis de asoleamiento de los prototipos en el terreno.

Localidad: Aquixtla, Puebla México.

Latitud: 19° 47'44'' N

Longitud: 97° 56'08'' W

Altura: 22192 msnm.

7.2.1 Análisis para el mes de marzo

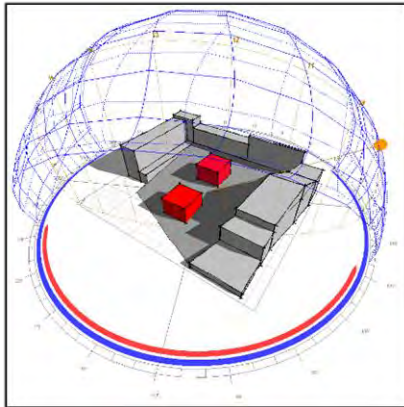


Figura 46. Marzo 21- 9 hrs.

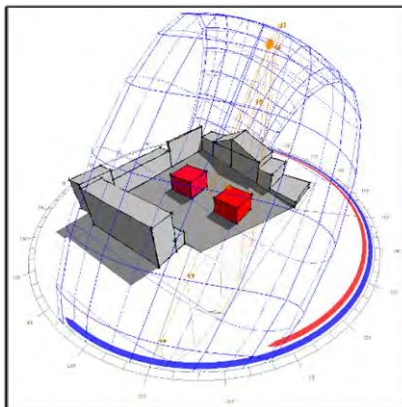


Figura 47. Marzo 21- 11 hrs.

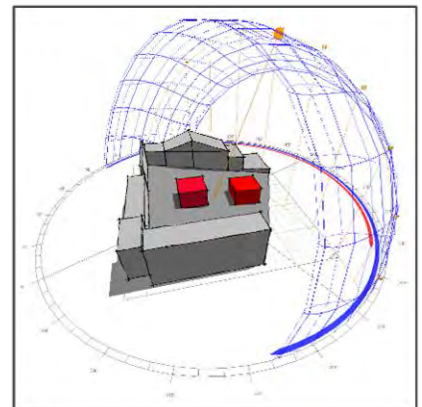


Figura 48. Marzo 21- 13hrs.

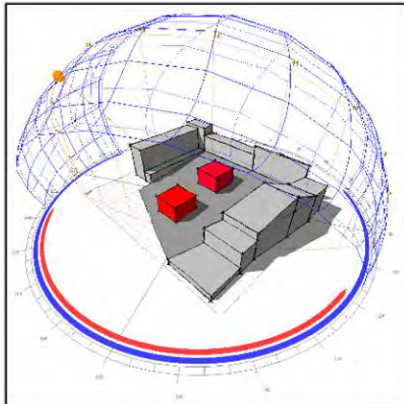


Figura 49. Marzo 21- 15 hrs.

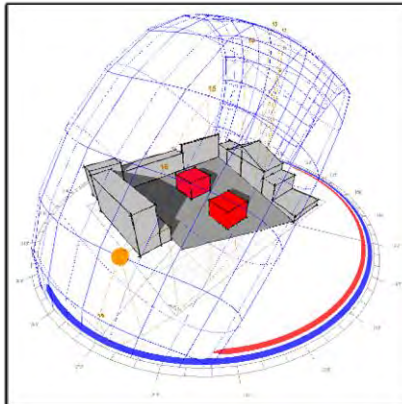


Figura 50. Marzo 21- 17 hrs.

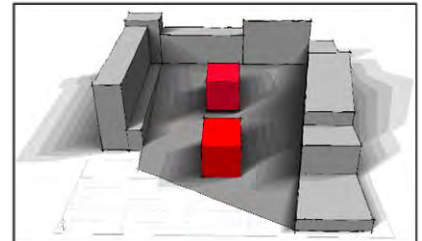


Figura 51. Marzo 21- Total

Como lo muestran los gráficos anteriores, el terreno donde se colocaron los prototipos es lo suficientemente amplio como para elegir una ubicación que favorezca el comportamiento del sol, podemos ver que a las 9 hrs. la sombra que arrojan las colindancias sobre el prototipo de tierra ya están lo suficientemente cortas y

a partir de esa hora ya no afectan el comportamiento de la temperatura interior, durante todo el día las sombras son parejas para ambos prototipos, es decir, la única sombra que interfiere es la del mismo prototipo, así hasta llegar a las 17hrs. donde ahora las sombras que provocan las colindancias del lado oeste apenas inician a tocar parte del prototipo de Block convencional, sin embargo se consideró que no sería un factor determinante o de relevancia para el comportamiento térmico de los prototipos.

7.2.2 Análisis para el mes de abril

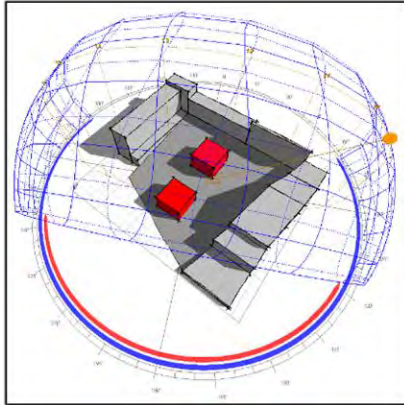


Figura 52. Abril 21- 9 hrs.

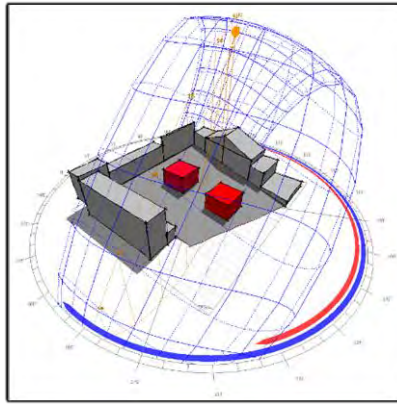


Figura 53. Abril 21- 11 hrs.

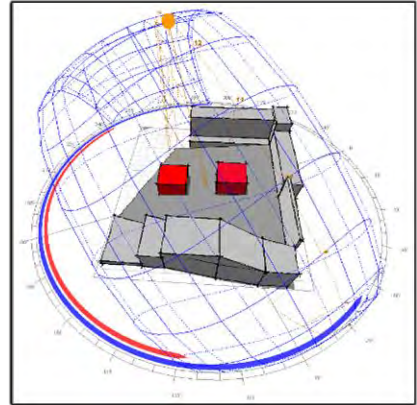


Figura 54. Abril 21- 13hrs.

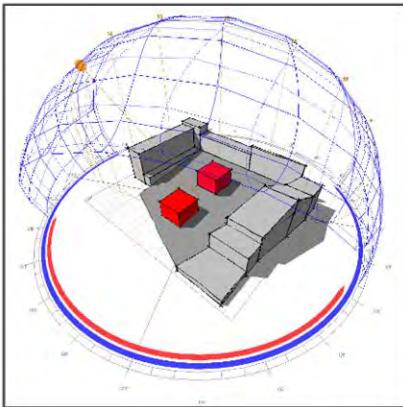


Figura 55. Abril 21- 15 hrs.

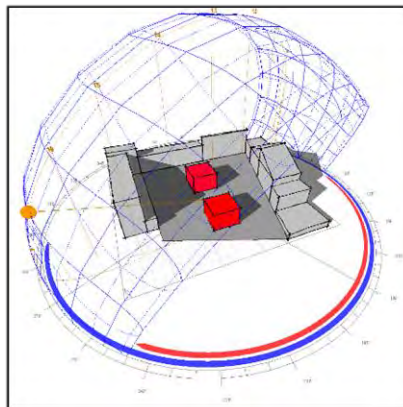


Figura 56. Abril 21- 17 hrs.

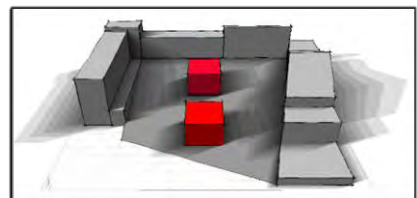


Figura 57. Abril 21- Total.

A diferencia del mes de marzo, donde los rayos del sol a las 8 hrs. aún tocaban un poco el prototipo de tierra cruda vertida compactada, en el mes de abril a la misma hora el sol ya está alejado de los prototipos, así es el comportamiento durante todo el día y lo mismo que el mes anterior al llegar a las 17 hrs. la sombra proyectada por las construcciones del lado oeste empieza a tocar el prototipo de block convencional.

7.2.3 Análisis para el mes de mayo

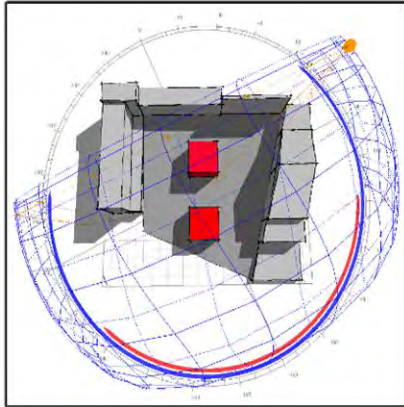


Figura 58. Mayo 21- 9 hrs.

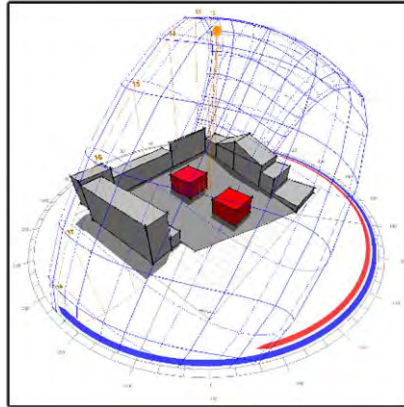


Figura 59. Mayo 21- 11 hrs.

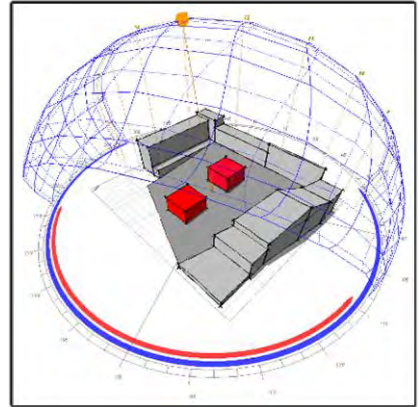


Figura 60. Mayo 21- 13hrs.

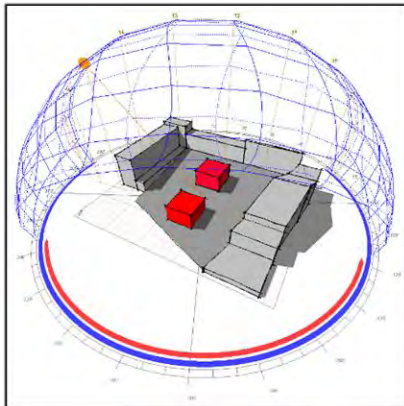


Figura 61. Mayo 21- 15 hrs.

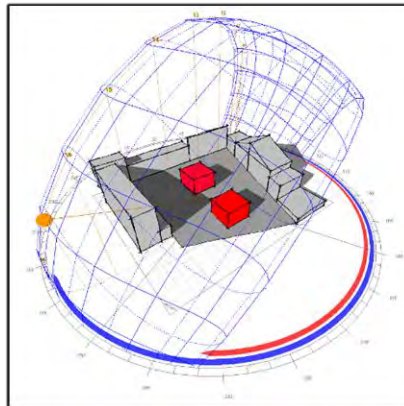


Figura 62. Mayo 21- 17 hrs.

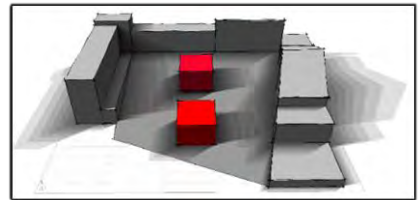


Figura 63. Mayo 21- Total.

Conforme avanzan los días del año, los rayos del sol pierden inclinación, esto nos favorece para nuestro experimento si consideramos que las sombras de las construcciones aledañas cada vez influyen menos sobre los resultados que obtuvimos. Por la tarde, al igual que los meses anteriores las sombras proyectadas aún alcanzan a tocar un poco el prototipo de block de concreto convencional, sin embargo como son rayos de sol bastante inclinados, consideramos que tales rayos no afectarían de manera significativa los resultados.

7.2.4 Análisis para el mes de junio

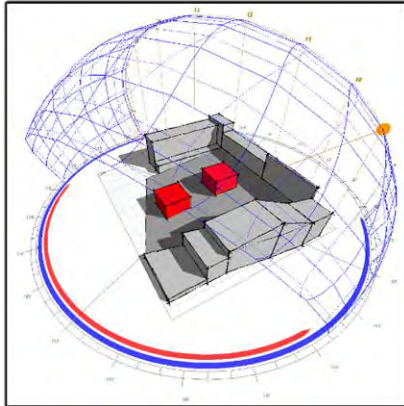


Figura 64. Junio 21- 9 hrs.

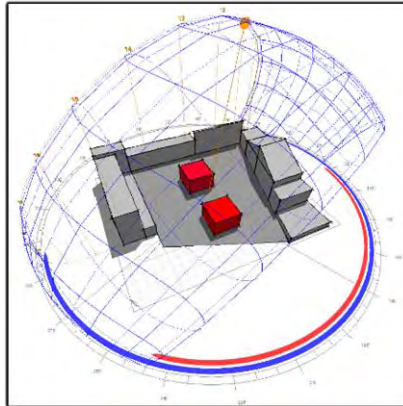


Figura 65. Junio 21- 11 hrs.

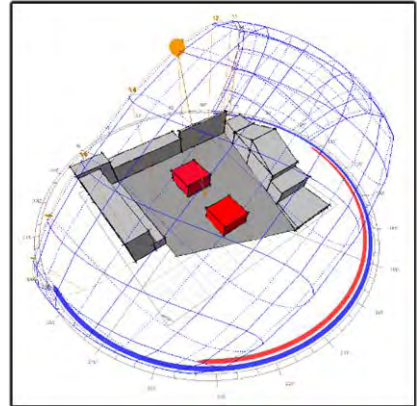


Figura 66. Junio 21- 13hrs.

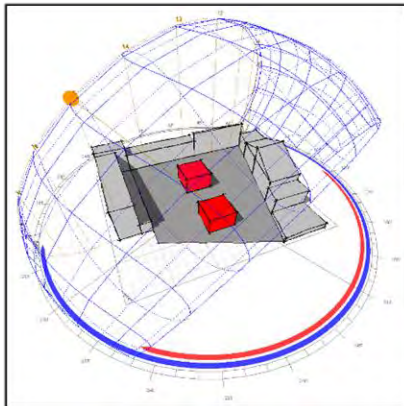


Figura 67. Junio 21- 15 hrs.

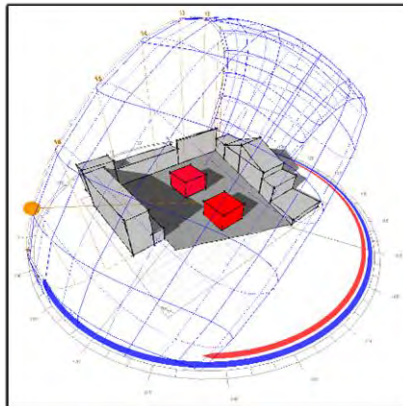


Figura 68. Junio 21- 17 hrs.

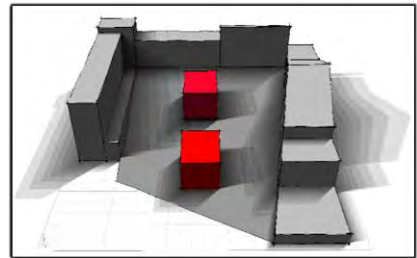


Figura 69. Junio 21- Total.

Para el mes de junio, los rayos de sol alcanzan a estar más verticales que los meses anteriores, podemos ver que a las 13 hrs. la sombra que proyectan las construcciones es básicamente nula, Para efectos del experimento esto nos favorece porque las sombras proyectadas de las construcciones vecinas que pudieran tocar los prototipos cada vez son menos, sin embargo pensando en construcciones futuras, para el mes de junio ya tendríamos que estar pensando el sombreado de algunas fachadas para evitar el sobrecalentamiento interior de los espacios.

7.3 CONSTRUCCIÓN DE LOS PROTOTIPOS

Una vez que se analizó la ubicación de los prototipos dentro del terreno y se determinó que la ubicación propuesta era la ubicación óptima para el análisis térmico, es decir; que dicha orientación era similar en condiciones de asoleamiento y ventilación para ambos prototipos. Se revisó el proyecto arquitectónico y se eligieron los materiales de construcción, materiales que como ya se ha venido mencionando, son materiales propios de la región con un impacto ambiental prácticamente nulo y que son los que se han utilizado durante muchos años, proseguimos a la construcción de los prototipos:

Dentro de la construcción con tierra es muy importante tomar en cuenta un análisis breve de los materiales que se van a utilizar, sobre todo de la tierra que se va a ocupar para hacer los muros de tierra. Recordemos que debido a que la conformación de las capas de la tierra se da a través del tiempo, no todas las capas de la tierra son aptas para ser utilizadas dentro de la construcción. Tal como lo menciona el Dr. Luis Guerrero:

“La capa intermedia que normalmente se encuentra entre los 50 cm y los 2 m de profundidad, es la más adecuada por poseer una variedad granulométrica que permite mantener estables los suelos al modificar sus condiciones de humedad” (Guerrero Baca L. , 2014)

Otro punto importante que debemos evitar, es utilizar la primera capa de la superficie terrestre, la que comúnmente llamamos capa vegetal, ya que por su alto contenido de nutrientes, es muy probable que una vez utilizada en la construcción, los hongos, bacterias y vegetación se desarrollen con facilidad y afecte nuestro sistema constructivo, además de que la capa vegetal de la tierra es muy importante para que otros seres vivos puedan desarrollarse y si la quitamos en gran medida, estaríamos quitando este medio de subsistencia muy importante para ellos.

Podemos observar en la Tabla 6 la clasificación de la granulometría de la tierra:

Tabla 6. Clasificación de los componentes de la tierra de acuerdo a su tamaño.

Componente.	Rango
Grava	Superior a los 2mm
Arena	0.06mm a 2mm
Limo	0.002mm a 0.06mm
Arcillas	Menores a 0.002mm

Aunque cada componente desempeña un papel importante dentro del conjunto del suelo y este vaya a variar en función del sistema constructivo que se utilice, el papel que desempeña la arcilla es clave por

tratarse del material aglomerante, mientras que la grava, la arena y el limo dan estructura y estabilidad al sistema. (Guerrero Baca L. , 2014)

El agua constituye otro elemento fundamental en el proceso constructivo ya que cumple dos funciones sustantivas. En primer lugar, permite el movimiento de las partículas sólidas de la mezcla, al transportar a las más pequeñas entre las de mayor tamaño. Y en segundo lugar, activa las propiedades adhesivas de la arcilla. (Rodríguez , 2002)

Puesto que las arcillas provienen de la erosión milenaria de las rocas, estas arcillas presentan comportamientos distintos unas de otras, podemos encontrar arcillas con un alto contenido de silicoaluminatos hidratados, que son los encargados de su comportamiento al combinarse con agua. Por lo tanto, podemos encontrar desde arcillas con un comportamiento muy inestable y por ende su adherencia puede ser muy alta hasta las arcillas que son básicamente inertes y más estables con el agua.

Entonces, así como ya mencionamos anteriormente cuales son los estándares granulométricos de los componentes de la tierra, ahora toca decir que existen varias recomendaciones de distintos autores acerca de la cantidad optima de arcilla que la tierra deberá contener para tener un buen comportamiento constructivo; es decir, que tenga la suficiente adherencia para conformar muros o adobes, y tenga cierta resistencia a la erosión causada por las lluvias: (McHenry, 1996), propone 15% de arcilla, (Doat, 1996), hablan de entre 15 y 18 % de arcillas, (Houben & Doat, 1982), especifican 20% y (Tejada, 2001), dice que “ en ningún caso se aceptaran suelos con más de 18% de arcillas”. (Guerrero Baca L. , 2014)

Para nuestro caso de estudio, se estimó la cantidad de arcilla contenida en la tierra que utilizamos para la construcción de nuestros prototipos, se hizo mediante un método que se basa en el fenómeno de sedimentación, se determinó que contenía entre un 15 y un 20% de arcilla, apto para la utilización en muros de TVC, (Ver Figura 70).

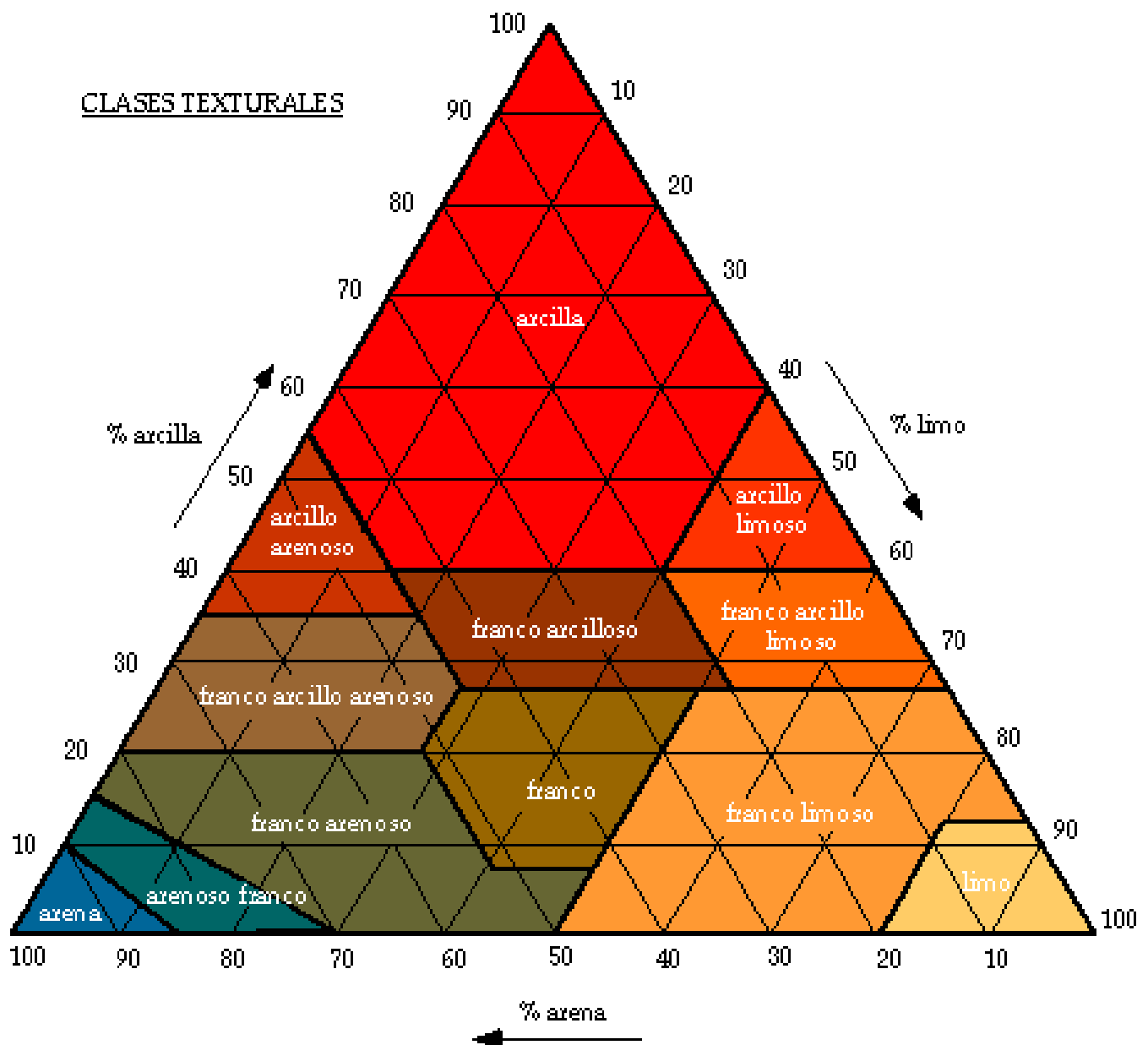


Figura 70. Triángulo de clases texturales, otorgado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.



Figura 71. Selección de la tierra que se utilizó en la construcción del prototipo de tierra vertida compactada y los techos de ambos prototipos.

Después de la correcta selección de la tierra, (Ver Figura 71). Se trazaron unas líneas guías en el terreno donde se iban a posicionar los prototipos, respetando el análisis solar que se hizo con el programa Ecotect Autodesk. Sobre estas líneas guías se desplantaron los muros de ambos prototipos, con este ejercicio



Figura 72. Trazo de los prototipos en el terreno.

también se pudo verificar la correcta orientación de los mismos, posicionando la cara principal sur perpendicular al eje norte sur del terreno. (Ver Figura 72).

Una vez que se hizo el trazo de ambos prototipos en el predio, se tuvo que hacer una sepa de 21cm de ancho y 15cm de alto, los 21cm corresponden al ancho de los muros que tendrían los prototipos con la finalidad de poder nivelar el terreno y sobre el terreno ya nivelado poder iniciar el desplante de los muros de los prototipos, (Ver Figura 73 y 74). Por cuestiones económicas y para fines de este ejercicio, se optó por omitir algún tipo de cimiento para ambos prototipos, sin embargo se analizó tal situación y debido a que el terreno está confinado por tepetate dimos por hecho que no habría ningún problema en que se quedara así.

Como ya habíamos visto anteriormente el ancho de los muros de ambos prototipos se propuso de 21cm con la finalidad de hacer una comparativa en los sistemas constructivos sin dar alguna ventaja a alguno de los dos por cuestiones de espesores, sin embargo la colocación de los blocks de concreto convencional (BCC) se hace en el sentido vertical de las piezas, es decir; el espesor de los muros normalmente es de

15cm, pero en este ejercicio se colocó en el sentido más ancho para que el muro quedara de 19 cm y con el repellado de ambos lados quedara de 21cm como se planeó hacer ambos prototipos, (Ver Figura 75).



Figura 73. Colocación de guías (reventones) para iniciar el desplante del prototipo.



Figura 74. Rascado de la base para poder nivelar el desplante de los prototipos en el terreno.



Figura 75. Colocación de los blocks de concreto convencional en el sentido horizontal.

Para el pegado de los blocks se hizo una mezcla de cal y arena en proporciones 1:3 con un poco de agua, con la intención de que la mezcla quedara como lo que comúnmente se llama “mezcla pobre” y una vez

que acabe el experimento los blocks se puedan quitar con facilidad y se puedan rehusar en alguna otra construcción.

Los cerramientos que confinan las puertas y ventanas se hicieron con madera, evitando así el uso de concreto y acero, esta técnica constructiva se ha utilizado desde muchos años antes y ha funcionado efectivamente cuando el sistema constructivo carece de refuerzos de acero con concreto, (Ver figura 76). Es importante que a la hora de colocar los refuerzos de madera en los vanos de puertas y ventanas que dichas vigas de maderas sean del largo del claro que se va a cubrir más una vez la medida del ancho del refuerzo en cada lado, así evitaremos que con el peso de la cubierta, la superficie de contacto con el muro de blocks sea insuficiente y termine por colapsarse. Después de colocar los cerramientos de madera se colocaron las vigas que dieron sustento a la techumbre del prototipo y distribuirán la carga de este hacia los muros, recordemos que nuestro sistema constructivo de muros es portante y por lo tanto todos los muros ejercen cierto esfuerzo dentro del sistema, (Ver Figura 77).



Figura 76. Colocación de la madera en la techumbre que dará sustento a la tierra compactada.



Figura 77. Colocación de las vigas que darán sustento a la techumbre del prototipo.

Posteriormente se colocó una cama de madera acerrada a manera de crear una base uniforme y sin espacios entre cada pieza de madera, se le agregó una capa de tierra compactada de 10cm de espesor con la finalidad de proporcionar masa térmica a la techumbre y así mejorar las condiciones térmicas interiores de ambos prototipos

Es importante colocar una barrera lateral de madera en todo el perímetro de nuestra techumbre para poder confinar la capa de tierra de 10 cm y evitar que la tierra se desborde por el perímetro, (Ver Figuras 78-81).



Figura 78. Colocación de la capa de tierra en la techumbre de ambos prototipos.



Figura 79. Colocación de la capa de tierra en la techumbre de ambos prototipos.



Figura 80. Colocación de la capa de tierra en la techumbre de ambos prototipos.



Figura 81. Colocación de la barrera perimetral de 10 cm de altura.

Es importante verificar que la tierra que se ocupa en los sistemas constructivos ya sea en muros o en este caso para la techumbre, esté libre de todo material orgánico como pastos o raíces que en un futuro puedan desarrollar algún tipo de vegetación no deseada y pueda afectar el experimento. Posteriormente se colocó una capa de teja de barro recocido típica de la región, (Ver Figura 82 y 83).



Figura 82. Colocación de las tejas de barro recocido.



Figura 83. Vista interior de la techumbre.

Para la construcción del prototipo de tierra cruda compactada fue necesario tomar en cuenta varios detalles antes de empezar con la construcción de los muros, como ya vimos anteriormente la selección de la tierra es muy importante para este ejercicio, por ello, se tuvo que buscar dentro de un radio considerable donde no se tuviera que ocupar transporte motorizado para el acarreo de la tierra hacia el terreno, verificar que la tierra cumpliera con los porcentajes granulométricos para poder ser utilizada como materia prima de muros, de lo contrario se tendría que haber estabilizado con cal o cemento. Sin embargo, en dicha prueba la tierra resultó ser apta para ocuparse sin ser estabilizada.

Lo primero que se hizo fue el rascado de la cepa donde se desplantaron los muros de tierra compactada, posteriormente se dio inicio con la colocación del encofrado de madera que daría confinación a los muros, es importante verificar que la madera que se ocupa para confinar muros de tierra compactada esté libre de "mezcla" de algún trabajo previo, de lo contrario esto provocaría que al quitar la madera, la cara del muro de tierra tenga imperfecciones que después se tendrían que resanar y no es lo más recomendable puesto que no quedaría un muro monolítico y estos resanes podrían desprenderse en algún momento, (Ver Figura 84).



Figura 84. Limpieza de la madera que se ocupó para el encofrado de los muros de tierra vertida compactada.

Después se hizo el armado del encofrado de madera; este se debe ir haciendo en coordinación con el llenado de tierra, es decir, para facilitarnos el trabajo se arma el encofrado hasta cierta altura, unos 50 o 60cm por cada periodo, (Ver Figura 85). Luego se van agregando tandas de unos 15 cm de tierra, la cual se apisona perfectamente hasta formar capas uniformes y bien compactadas, (Ver Figura 86). Tal como lo describe Gernot Minke en su manual de construcción para viviendas antisísmicas con tierra:

“En comparación con técnicas en las que el barro se utiliza en un estado más húmedo, la técnica del tapial brinda una retracción mucho más baja y una mayor resistencia. La ventaja en relación a las técnicas de construcción con adobe, es que las construcciones de tapial son monolíticas y por lo tanto poseen una mayor estabilidad.

Al utilizar pisonos de base cónica y aquellos que tienen forma de cuña, las capas del barro se mezclan mejor y se obtiene una mayor cohesión si se provee a la mezcla una humedad suficiente. No obstante el apisonado con este tipo de pisonos requiere de un mayor tiempo que aquel ejecutado con pisonos de base

plana. Los muros apisonados con pisones de base plana, muestran uniones laterales débiles y por ello deben recibir solamente cargas verticales". (Gernot, Manual de construcción para viviendas antisísmicas con tierra., 2005)

Así mismo algunos autores nos dan algunas recomendaciones acerca de la época en que es conveniente construir con tierra cruda compactada:

"La tierra debe ponerse en un estado de humedad que la haga adherente y tome consistencia al apisonarla en el molde o tapial. Las tapias de tierra deben construirse en la primavera, porque en esta época del año entran los calores y las secan lentamente, que es lo que conviene. Los calores del estío, que las secan con prontitud, producen grietas; el otoño no es favorable a causa de las lluvias, y al menos en invierno, si el país está bajo la influencia de las heladas". (ESPASA, 1993)



Figura 85. Capa de tierra compactada dentro del encofrado.



Figura 86. Armado del encofrado de madera que servirá para confinar los muros de tierra.

De igual manera que en el prototipo de block de concreto convencional, los cerramientos de la puerta y las ventanas se hicieron de madera, se colocaron las vigas de refuerzo para dar sustento a la techumbre y se hizo el mismo procedimiento de colocar la cama de madera con sus topes laterales, se agregaron 10 cm de tierra compactada y por último se hizo el tendido de teja de barro recocido, (Ver Figuras 87, 88 y 89).



Figura 87. Prototipo de TVC con techumbre.



Figura 88. Ambos prototipos, al fondo el prototipo de block convencional ya revocado.



Figura 89. Armado de la cimbra que se utilizó para hacer los muros de TVC.

Una vez que se levantaron los muros; tanto de block convencional como de tierra cruda compactada, se le agregó una capa de repellado a ambos prototipos, (revoco), con proporciones 1:3 de cal con arena y una octava parte de cemento solo para estabilizar un poco el repellado y así este no sufriera desmoronamiento, se hizo una mezcla de cal, mucilago de nopal y sal para aplicársele como pintura natural, las proporciones utilizadas para dicho acabado fueron; 4 kg de cal por cada 10 l de agua, medio kilo de sal y la baba de 2 kg de mucilago de nopal maduro, (Ver Figuras 90 -93).



Figura 90. Ambos prototipos ya terminados, al fondo el prototipo de block convencional y al frente el de tierra compactada, vista sur-este.



Figura 91. Vista este del prototipo de block de concreto convencional.



Figura 92. Detalle de la techumbre de ambos prototipos.



Figura 93. Ambos prototipos ya terminados, al fondo el prototipo de block convencional y al frente el de tierra compactada, vista sur-oeste.

Por último se colocaron las ventanas hechas de madera y cristal claro de 4mm, se colocaron las puertas hechas de madera maciza y se sellaron todas las juntas de las ventanas con silicón convencional.

A la techumbre de ambos prototipos se le dio una pendiente del 8% hacia el lado sur, también se hizo un pequeño volado en los 4 lados para cubrir las paredes de la lluvia.

Una vez finalizada la construcción de los prototipos experimentales, se pidió el apoyo al posgrado de la universidad (UAM.AZC) para solicitar el préstamo del equipo necesario para realizar un análisis térmico.

7.4 INSTRUMENTOS DE ANÁLISIS TÉRMICO

Para la realización del experimento que más adelante se planteará será necesario el uso de instrumental especializado en el registro de datos de temperatura interior y exterior de los espacios. Por ello se hizo un esfuerzo por conseguir el equipo profesional necesario para que los objetivos de esta investigación se pudieran alcanzar en tiempo y forma, siendo la misma Universidad Autónoma Metropolitana la institución proveedora que prestó los equipos necesarios para dicha investigación.

Puesto que el objetivo del experimento es realizar la caracterización térmica de dos sistemas constructivos, se tendrán que medir térmicamente los dos prototipos, (uno hecho con block de concreto convencional y el otro con muros de tierra cruda compactada) y también se tendrá que monitorear la temperatura exterior para tomarla como referencia a la hora de comparar los datos obtenidos.

Para ello se utilizaron los siguientes instrumentos:

A.- 3 medidores de temperatura data-logger Marca: Lascar, Modelo: EL-USB-2-LCD para registrar temperatura de bulbo seco en el exterior y el centro interior de ambos prototipos, (Ver Figura 94).



Figura 94. Data-logger Marca: Lascar, Modelo: EL-USB-2-LCD
(Foto tomada de la Pág. Oficial de Lascar).

B.- 10 medidores de temperatura data-logger para superficie Marca: Lascar, Modelo: EL-USB-TC-LCD para registrar temperatura de bulbo seco en las superficies interiores de ambos prototipos; muro norte, sur, este, oeste y plafón, (Ver Figura 95).



Figura 95. Data-logger para superficie Marca: Lascar, Modelo: EL-USB-TC-LCD (Foto tomada de la Pág. Oficial de Lascar).

C.- 1 Instrumento multifuncional portátil Data-logger marca Delta OHM, modelo; DO 9847K, para medir la temperatura radiante media en el prototipo de tierra cruda compactada, (Ver Figura 96).



Figura 96. Instrumento multifuncional portátil Data-logger marca Delta OHM, modelo; DO 9847K (Foto tomada de la Pág. Oficial de Delta OHM).

D.- 1 Sonda globo-termómetro para medir el del calor radiante de 150mm de diámetro ISO7726. Pt100 4 hilos y cable de 2m, (Ver Figura 97).

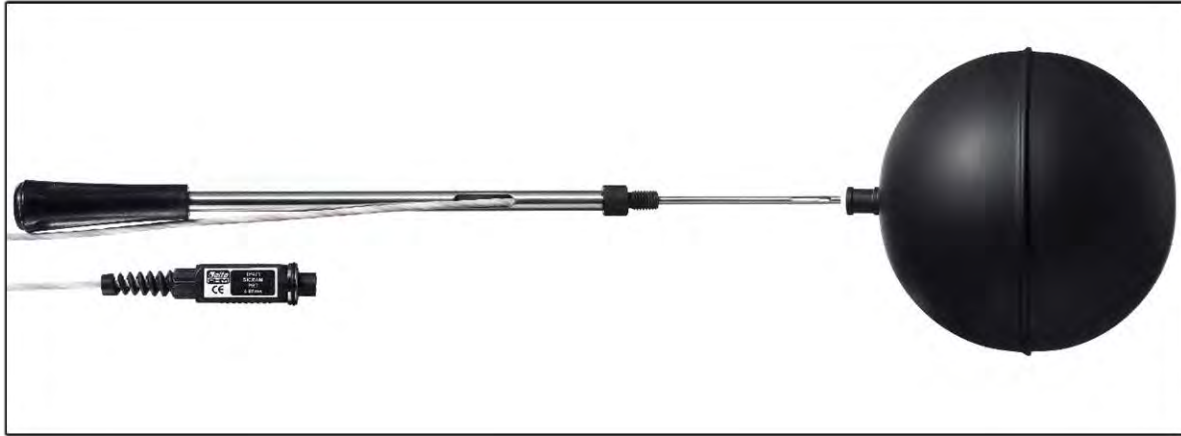


Figura 97. Sonda globo-termómetro para medir el calor radiante, diámetro de 150 mm.

7.5 INSTALACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Ya concluida la construcción de ambos prototipos, la instalación de los instrumentos de medición térmica se debe realizar con el mayor cuidado posible, siempre previendo cualquier fenómeno o acontecimiento que pueda causar una mala captura de datos.

Lo primero que debemos hacer antes de iniciar con la instalación de los instrumentos es; analizar muy bien cuál es la temperatura que nos interesa medir, es decir, no es lo mismo una medición a ras de piso dentro un prototipo que una al centro del prototipo, ni mucho menos una medición en un punto cercano a una ventana etc. Por ello una vez que tenemos claro cuáles son los puntos que queremos medir, proseguimos con la instalación de los termómetros data logger. Para nuestro experimento se instalaron 13 termómetros data logger que estuvieron registrando la temperatura a cada 30 minutos en los siguientes puntos:

Temperatura exterior: La colocación de este termómetro es muy importante porque es la referencia que se tendrá para comparar ambos prototipos, entonces su colocación se debe hacer en el exterior de ambos prototipos, en un lugar cercano a la ubicación de ellos, para esto se debe colocar dentro de una caja de Stevenson, con la finalidad de que el sol, la lluvia o algún otro fenómeno climatológico no pueda dañar el termómetro data logger.

Prototipo de tierra / block convencional: Muro norte, muro sur, muro este, muro oeste, plafón y centro del prototipo. Una de las cosas que debemos tomar en cuenta al instalar los termómetros dentro de cualquiera de los prototipos es pensar que como dichos prototipos tienen ventanas y por ende, en alguna hora del día el sol puede entrar por alguna de ellas, es posible que los rayos del sol toquen el sensor y esta

captura de temperatura se eleve de manera no uniforme respecto a la medida real del interior del prototipo, por ello se consideró optar por algunas medidas respecto a esta falla que muchas veces ocurre en este tipo de experimentos. Primero, los sensores que se colocaron tanto en los muros como en el plafón, se les colocó un aislante de poli estireno expandido (unicel) para que el termómetro registrara únicamente la temperatura del muro/plafón, también para evitar que los rayos del sol que pudieran alcanzar a tocar un sensor; no afectarían de manera significativa en el comportamiento térmico que registraría dicho sensor, (Ver Figura 98). El sensor que se colocó al centro del prototipo se metió dentro de una caja de Stevenson provisional, se colocó a la mitad de la altura del alto total interior del prototipo, (Ver Figura 99). Posteriormente se colocó un sensor en el centro del plafón de cada uno de los prototipos, tanto en el de TVC como en el de BCC, (Ver Figura 100).

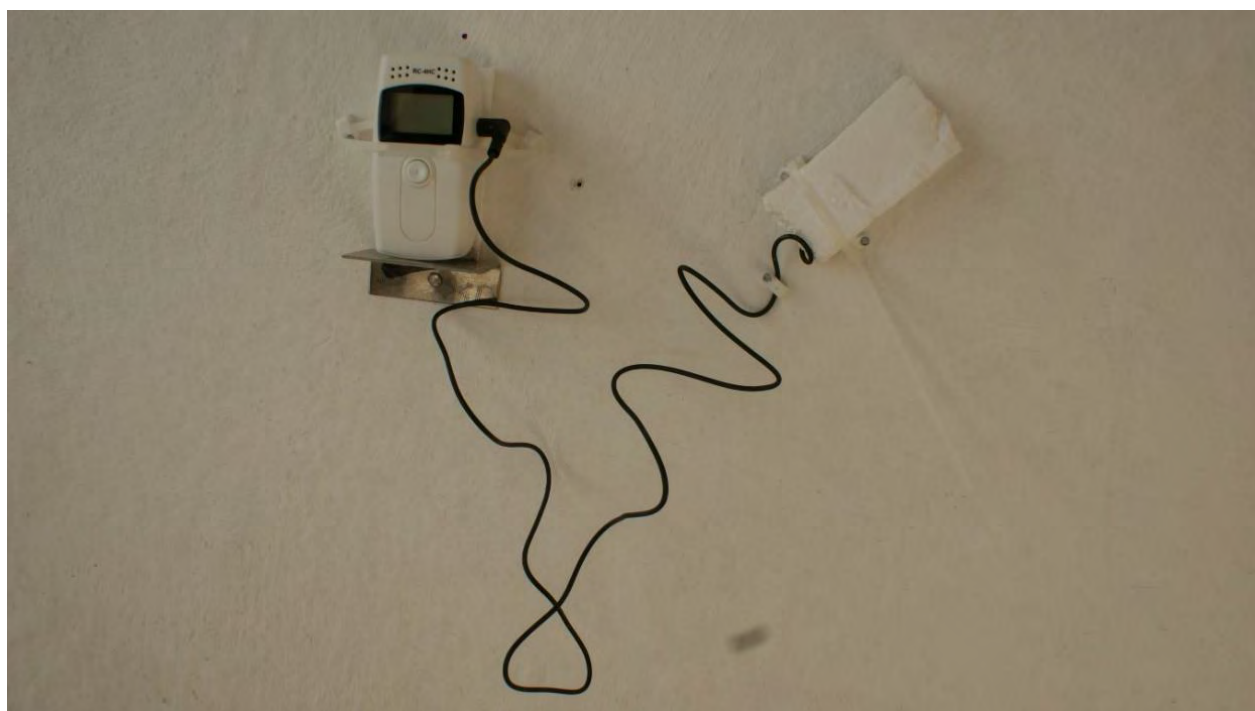


Figura 98. Instalación de data logger en muros interiores de ambos prototipos.



Figura 99. Instalación de caja de Stevenson con data logger en el centro de ambos prototipo.



Figura 100. Instalación de data logger en el plafón de ambos prototipos.

7.6 REALIZACIÓN DE MEDICIONES TÉRMICAS DEL 06 AL 26 DE MARZO DE 2016

Para la realización de esta primera etapa de medición fue necesario adaptar 6 sensores de temperatura de bulbo seco con data logger en ambos prototipos, y uno al exterior de ellos con la finalidad de tomar la temperatura exterior y ocuparla como referencia a la hora de hacer nuestro análisis térmico.

Los data logger quedaron dispuestos de la siguiente manera; muro este, muro sur, muro oeste, muro norte, plafón y uno al centro de ambos prototipos. Es importante tomar en cuenta el cuidado que se debe de tener para que en ambos prototipos, los sensores queden acomodados de la misma manera, es decir, misma ubicación en el muro, misma altura en el sensor del centro, misma posición en el plafón y de manera sobresaliente, mismo arreglo para los sensores, esto es, a los sensores de superficie que se colocaron en los muros y plafones, se les hizo un arreglo con poli estireno expandido (Unicel) para tener una mejor calidad en la medición de superficies, así mismo se les colocó una base de acero inoxidable para evitar cualquier tipo de movimiento del sensor y para que en el tiempo que duró la medición no sufriera ningún desarreglo.

A continuación se muestran las diferentes gráficas que se hicieron referente a las tres temperaturas de bulbo seco y que corresponden a la temperatura ambiente exterior (color azul), temperatura interior del prototipo de tierra (color marrón) y la temperatura interior del prototipo de block convencional (color blanco).

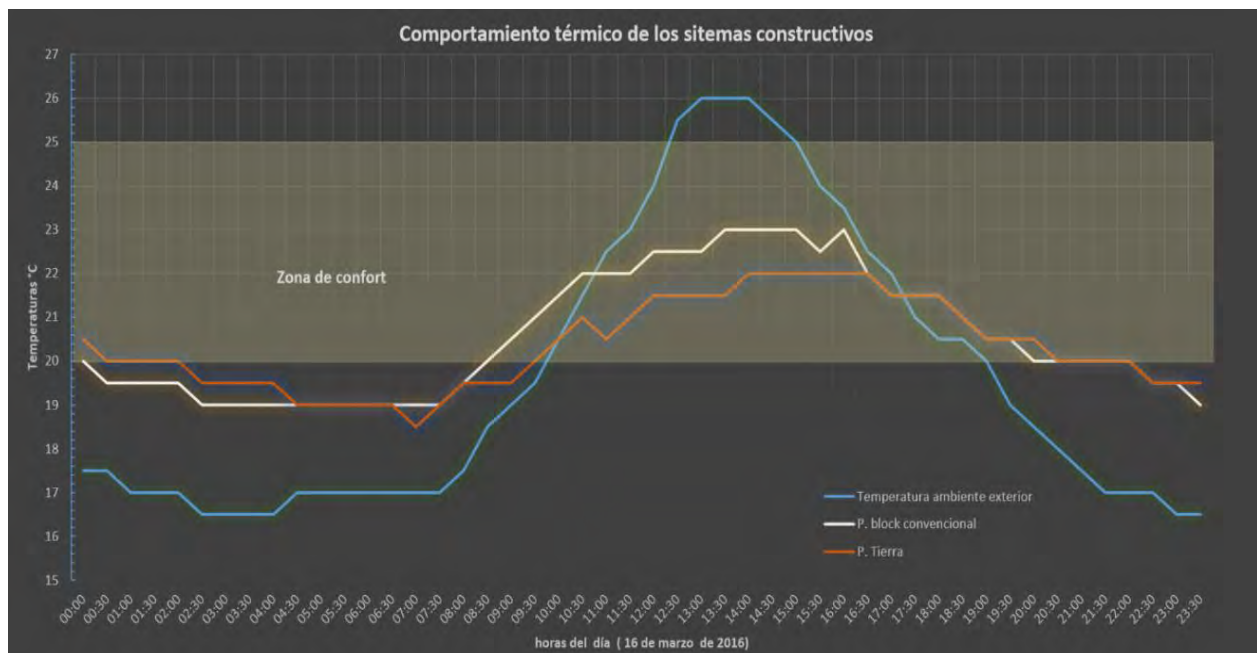


Figura 101. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 16 de marzo de 2016.

En la Figura 101 podemos observar el comportamiento térmico para un día en el mes de marzo, en el que se puede ver que la temperatura ambiente tiene un comportamiento que presenta una gran oscilación térmica, alcanzando temperaturas mínimas hasta de 16.5 °C en la madrugada, en horarios que van de las 2:00hrs a las 4:00hrs. Y contrario a estas temperaturas, durante el día se alcanzaron temperaturas de hasta 26°C en un horario de las 13:00hrs a las 15:00hrs, superando incluso la zona de confort que va de los 20°C a los 25°C tomando en cuenta una temperatura neutra de 22.5°C, quiere decir que en un día como este existió una oscilación térmica de 9.5°C y las temperaturas mínimas y máximas se alcanzaron a las 2:00hrs y las 13:00hrs respectivamente. Respecto a las temperaturas interiores en ambos prototipos el comportamiento térmico responde a una de las principales estrategias bioclimáticas para un clima semifrío, la masa térmica. Se observa en la gráfica que la temperatura de ambos prototipos tiene un acercamiento significativo a la zona de confort, alcanzando temperaturas mínima de 18.5°C en la madrugada, en un horario de 5:00hrs a 7:00hrs y una temperatura máxima para el prototipo BCC de 23°C a las 15:00hrs, mientras que el prototipo de TVC su máxima es de 22°C a las 16:00hr. Se puede ver que ambos prototipos alcanzan a entrar en el rango de confort entre las 8:00 y 9:00hrs, teniendo dicho comportamiento térmico confortable hasta las 22:00hrs, horario en el que la temperatura empieza a descender, sin embargo, podemos observar que en las horas más críticas de la madrugada el prototipo de TVC presenta un mejor comportamiento térmico, manteniéndose 1°C por arriba del prototipo de BCC en las horas que van de las 23:00hrs a las 4:00hrs.

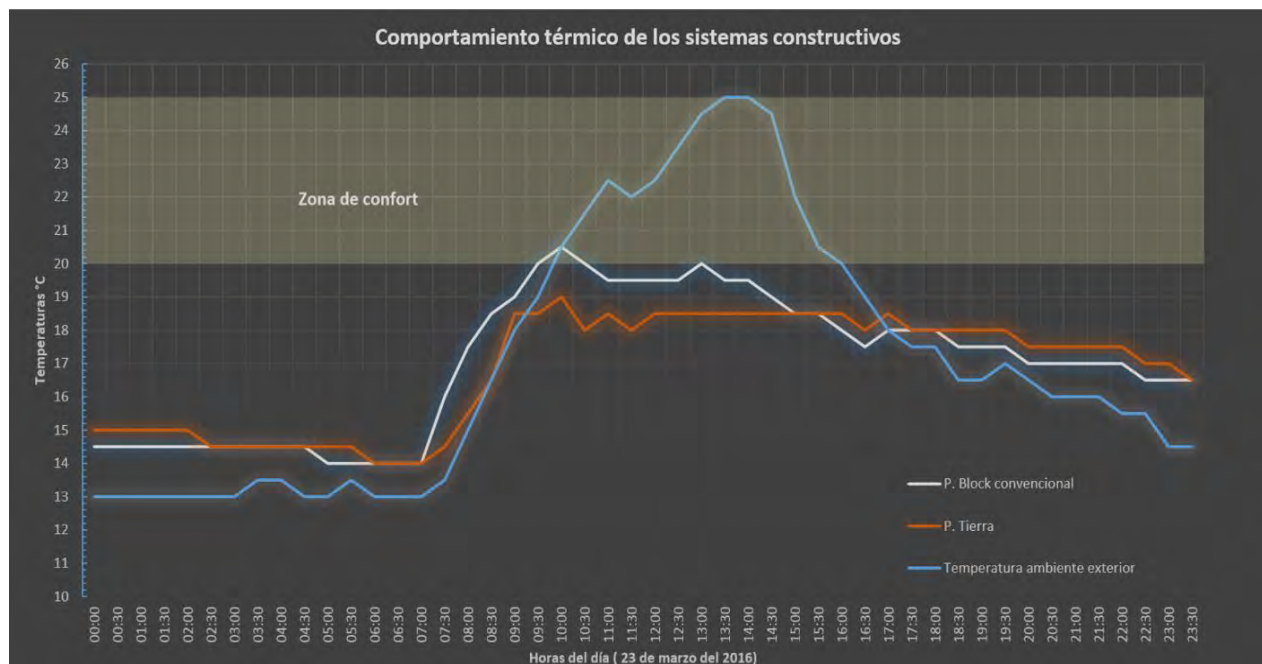


Figura 102. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 23 de marzo de 2016.

El 23 de marzo, representado por la Figura 102, es un día muy interesante que muestra algunos de los beneficios de la construcción con TVC, podemos ver que la temperatura del ambiente exterior tiene una oscilación térmica de 12°C en menos de 15 horas, esto es, su temperatura mínima que es de 13°C la alcanza en un horario que va de las 0:00hrs y hasta las 7:00hrs y la temperatura máxima con valores de hasta 25°C se tiene a las 14:00hrs. La temperatura del ambiente exterior presenta niveles de confort en horarios que van de las 10:00hrs hasta las 16:00hrs, respecto a las temperaturas en los prototipos, el de TVC se sigue conservando 1°C por arriba de la temperatura en el prototipo de BCC, alcanzando temperaturas a las 6:00hrs de 14.5°C y su máxima de 19°C a las 10:00hrs, sin embargo dichas temperaturas no alcanzan para posicionar la línea de temperaturas por adentro de la zona de confort. Algo interesante que se observa también, es el retardo térmico que el prototipo de tierra presenta de mejor manera respecto al prototipo de BCC.



Figura 103. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 09 de marzo de 2016.



Figura 104. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 10 de marzo de 2016.



Figura 105. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 11 de marzo de 2016.



Figura 106. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 12 de marzo de 2016.

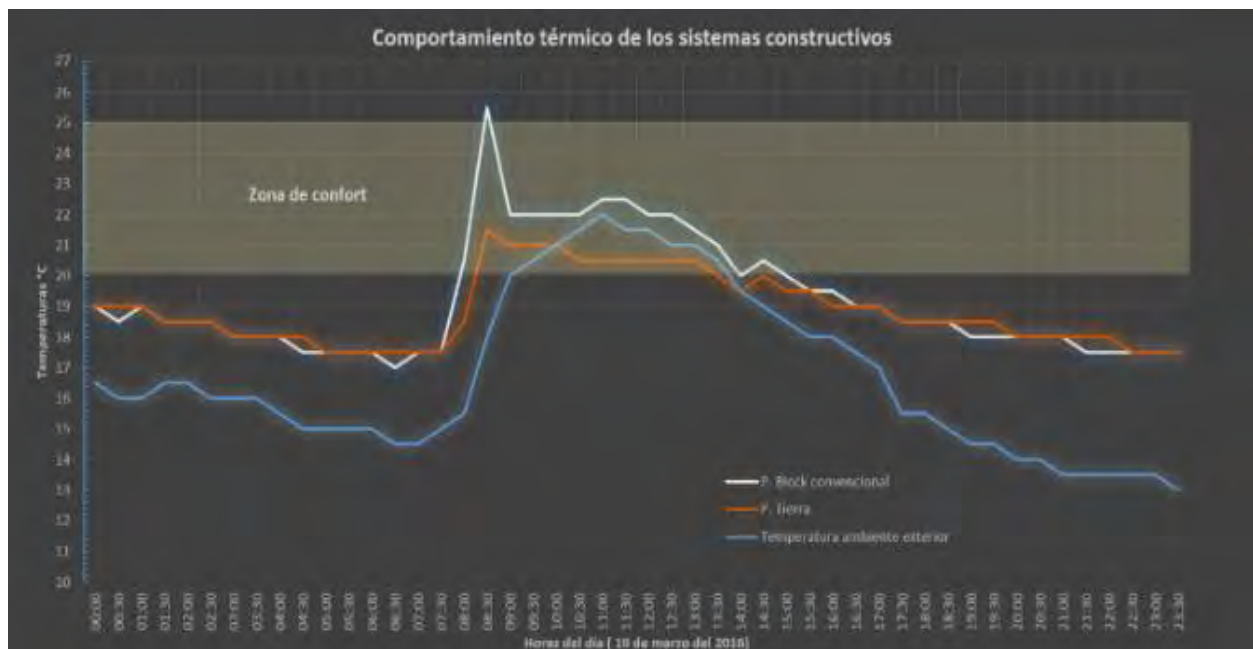


Figura 107. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 19 de marzo de 2016.



Figura 108. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 21 de marzo de 2016.

En las Figuras 103-108, podemos ver el comportamiento térmico de los prototipos con respecto al comportamiento de la temperatura del ambiente exterior. De manera general podemos ver que en todos los días, la temperatura ambiente exterior se encuentra por debajo de la zona de confort, mostrando valores mínimos que van de los 7°C a los 15°C en horarios de las 6:00hrs a las 7:00hrs, por otro lado, las temperaturas máximas durante el día, alcanzan valores de hasta 23°C en horarios cercanos a las 16:00hrs. Podemos observar también que en algunos casos, el prototipo de BCC llega a alcanzar niveles superiores de temperatura respecto al prototipo de TVC, sin embargo, el prototipo de TVC presenta mejores condiciones térmicas en horas críticas como lo es la madrugada y en horarios diurnos donde la temperatura alcanza niveles de 25°C aproximadamente, que aunque teóricamente estaríamos por debajo de la zona de confort, la sensación térmica juega un papel importante para el análisis de confort térmico.

7.7 REALIZACIÓN DE MEDICIONES TÉRMICAS DEL 10 AL 29 DE ABRIL DE 2016

Se realizó una segunda etapa de mediciones térmicas para ambos prototipos, en esta segunda etapa de mediciones que fueron durante el mes de abril pudimos observar tanto días fríos como días cálidos, a continuación mostraremos algunos días típicos en donde el comportamiento térmico del interior de los prototipos muestra de manera más clara los fenómenos térmicos que suceden durante estos días. El día 12 de abril se presentó una temperatura exterior alta comparado con la temperatura que normalmente se registra en la región, se alcanzaron valores de temperatura de hasta 28 °C, en horarios que van de las 14:00hrs hasta las 16:00hrs.

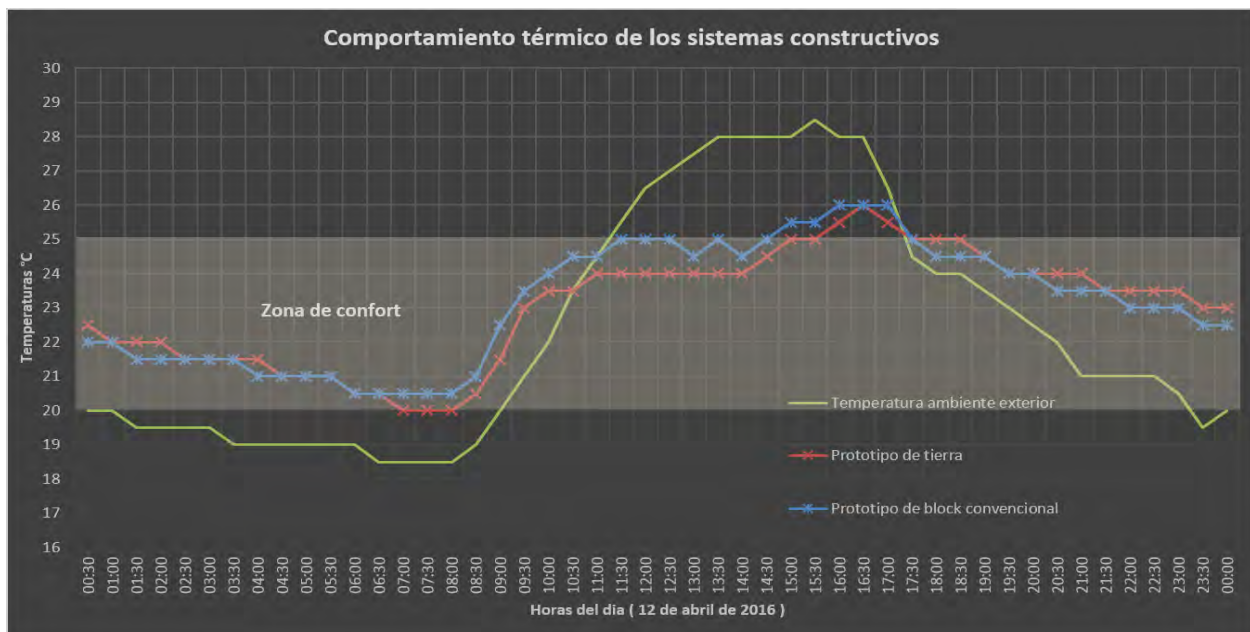


Figura 109. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior del día 12 de abril de 2016.

Es evidente que durante este horario la temperatura exterior supera los límites de confort, (Ver Figura 109). Sin embargo debido a las propiedades térmicas de los sistemas constructivos utilizados en los prototipos, esta temperatura diaria extrema solo alcanza a superar el límite de la zona de confort de manera significativa como lo hace la temperatura exterior en una hora del día, la masa térmica de los materiales utilizada en los muros de los prototipos hace que esta temperatura sufra un amortiguamiento térmico de 3.5°C grados para el prototipo de BCC y unos 4°C para de TVC, entonces, podemos concluir que el prototipo de TVC tiene un comportamiento térmico ligeramente mejor puesto que tanto la temperatura así como la sensación térmica se acercan a la zona de confort, recordemos que debido a que el clima de la región regularmente es frío, estos días calurosos aumentan la sensación térmica de las personas y tales días son calificados comúnmente como muy calurosos, por lo tanto, aunque las gráficas indiquen y posicionen las líneas de temperatura dentro de la zona de confort, tales temperaturas en realidad son temperaturas altas para los ocupantes. Para horarios críticos de la madrugada, el prototipo de TVC presenta mejor comportamiento térmico, en horarios que van de las 21:00hrs a las 4:00hrs del día siguiente, la temperatura interior del prototipo de TVC está por arriba de la temperatura del prototipo de BCC.

Ahora presentamos la gráfica del comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 21 de abril, un día frío el que la temperatura exterior llega a los 13.5°C en un horario de 7:00hrs a 7:30hrs. La temperatura máxima se presenta entre las 12:00hrs y las 12:30hrs, sin embargo, durante todo el día y la noche la temperatura exterior se encuentra por debajo de los límites de la zona de confort, (Ver Figura 110 Referente al comportamiento térmico de los prototipos), ambos se encuentran en todo momento por debajo de la zona de confort y aunque los muros proporcionan 2°C de amortiguamiento térmico, la temperatura exterior siempre está por debajo de la zona de confort.

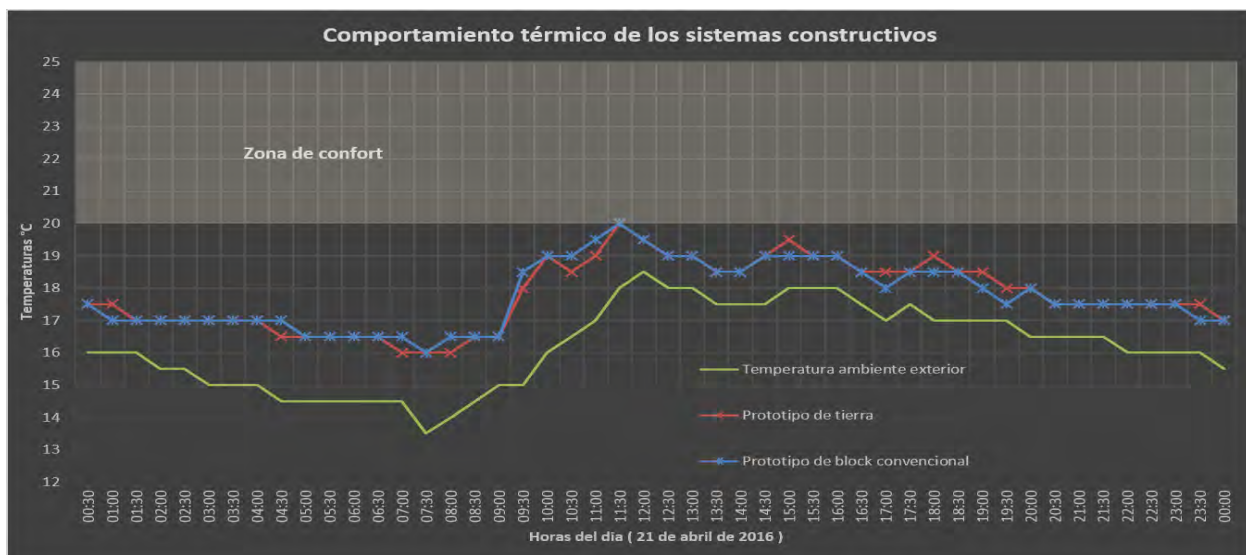


Figura 110. Comportamiento térmico de ambos prototipos y temperatura exterior para el día 21 de abril de 2016.

7.8 INSTALACIÓN DE TERMÓMETRO DE GLOBO PARA LAS MEDICIONES TÉRMICAS DEL 29 DE MAYO AL 04 DE JUNIO DE 2016

Puesto que el análisis térmico de los prototipos se plantea hacer de la manera óptima posible, se han tomado otras medidas alternas respecto a la recolección de la información térmica de su comportamiento.

Por ello, se pretende hacer un análisis térmico más completo y así poder ampliar el aporte de conocimiento al diseño bioclimático.

Se instalaron nuevamente los termómetros de bulbo seco al interior de ambos prototipos, se instaló el termómetro exterior a ellos (Temperatura exterior de referencia) y se instaló el termómetro de globo en el prototipo de TVC para poder determinar la temperatura radiante media del mismo, (Ver Figuras 111, 112 y 113).

Debido a que la velocidad del aire interior del prototipo de tierra que es en el que se instalará el termómetro de globo es nula, se tomará la temperatura de globo como la temperatura radiante media;

La temperatura de globo se obtiene mediante un termómetro cuyo bulbo se encuentra dentro de una esfera de cobre de espesor fino, pintada de color negro humo para maximizar la absorción de radiación infrarroja. El valor obtenido con este dispositivo es una manifestación del balance entre el calor ganado o perdido por radiación y el calor ganado o perdido por convección. La temperatura de globo es entonces aquella en la que se logra el equilibrio entre las pérdidas y ganancias de calor. Si la velocidad relativa del aire es muy reducida la temperatura de globo tiende a ser similar a la temperatura radiante media. (SOL-ARQ, 2004).



Figura 111. Instalación de termómetro de globo en el prototipo de tierra cruda compactada.



Figura 112. Instalación de termómetro de globo en el prototipo de tierra cruda compactada.



Figura 113. Instalación de termómetro de bulbo seco en muros este y sur de ambos prototipos.

7.9 REALIZACIÓN DE MEDICIONES TÉRMICAS DEL 29 DE MAYO AL 04 DE JUNIO DE 2016

En esta tercera etapa de mediciones térmicas se incluyó un termómetro de globo para registrar la temperatura radiante media del interior del prototipo de TVC, (Ver Figuras 114 y 115) podemos observar que para días calurosos, en los que la temperatura exterior asciende sobre los 20 °C, el sistema constructivo de TVC responde de mejor manera respecto al prototipo de BCC, la temperatura exterior tuvo una oscilación térmica de 6 °C, por ello es que podemos apreciar de manera significativa el comportamiento de la masa térmica de los sistemas constructivos, como ya se había notado en las gráficas de los días anteriores, en este caso se vuelve a notar que aunque ambas temperaturas interiores de los prototipos se encuentran dentro de la zona de confort durante todo el día y toda la noche, la sensación térmica de los ocupantes en los espacios interiores con más de 22 °C aseguran sentir una sensación de calor que los posiciona en un estado de dis confort térmico, por lo tanto, para este día caluroso el sistema constructivo de TVC mejora las condiciones térmicas interiores presentando hasta 2.5 °C de diferencia respecto al BCC.



Figura 114. Instalación de caja de Stevenson y termómetro de globo, termómetro de bulbo seco dentro del prototipo de tierra cruda compactada.



Figura 115. Instalación de caja de Stevenson y termómetro de globo, termómetro de bulbo seco dentro del prototipo de tierra cruda compactada.

La temperatura radiante media en el prototipo de TVC por la mañana es mayor que la temperatura de bulbo seco porque los muros de TVC aun irradian calor del que ha estado acumulado durante toda la noche, por el contrario en horarios de 16:00hrs a las 20:00hrs es menor porque la temperatura alcanzada al interior del prototipo es mayor que la irradiada por muros y nuevamente iniciará el fenómeno de la transmisión de calor.

A partir de las 21:00hrs y hasta las primeras horas del día siguiente los muros inicial el procesos de transferencia de calor hacia el interior, por eso la Figura 116 nos muestra una ligera diferencia entre la temperatura de bulbo seco y la temperatura radiante media

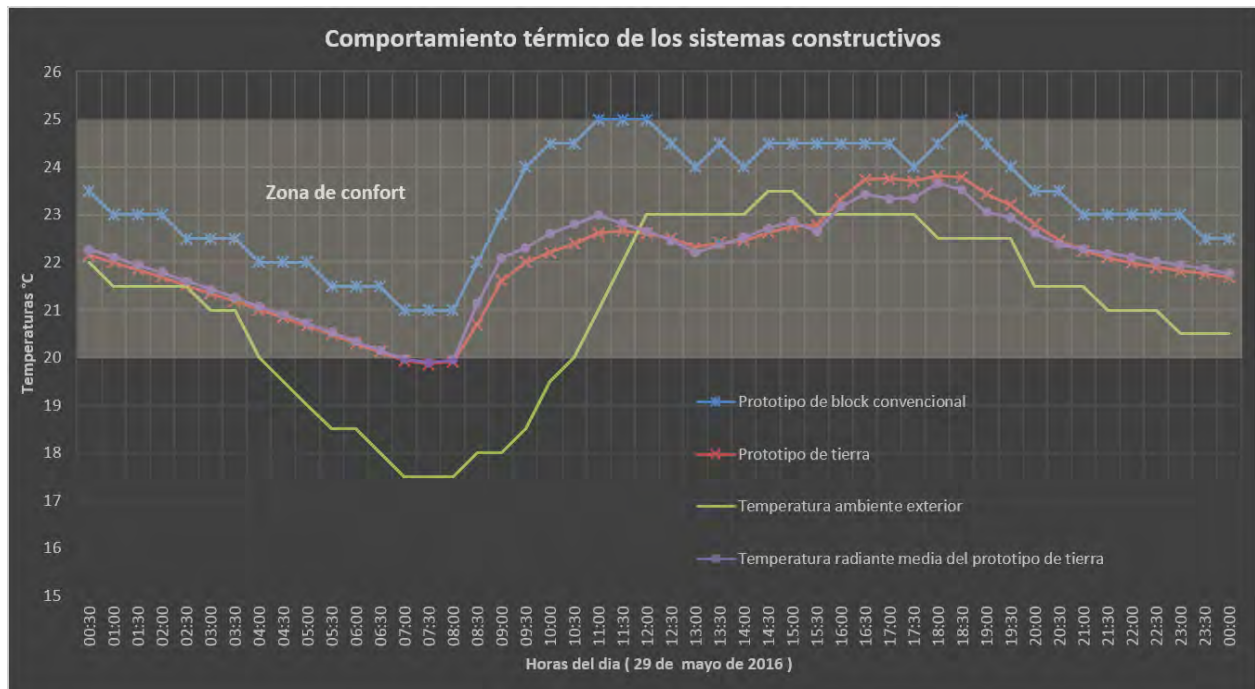


Figura 116. Comportamiento térmico de ambos prototipos, temperatura exterior y temperatura de globo en el prototipo de TVC para el día 29 de mayo de 2016.

A continuación mostramos un día del mes de junio en donde las temperaturas registradas son más frías que el día presentado anteriormente, (Ver Figura 117) la temperatura exterior registra la temperatura mínima de 17°C mientras que la temperatura máxima se da a las 12:00hrs con una máxima de 22°C. Las temperaturas interiores de ambos prototipos se comportan de manera similar, la diferencia entre ellas y la temperatura radiante media es menor a 1°C, en ninguna hora del día la temperatura exterior supera la temperatura interior de los prototipos, solo el lapso de entre las 10:30hrs y las 14:30hrs la temperatura exterior se encuentra dentro de la zona de confort, por el contrario, las temperaturas interiores de los prototipos se encuentran dentro de la zona de confort de 8:00hrs a 21:00hrs, quiere decir que con los sistemas constructivos estamos proporcionando 8hrs más de confort para el interior de estos espacios.

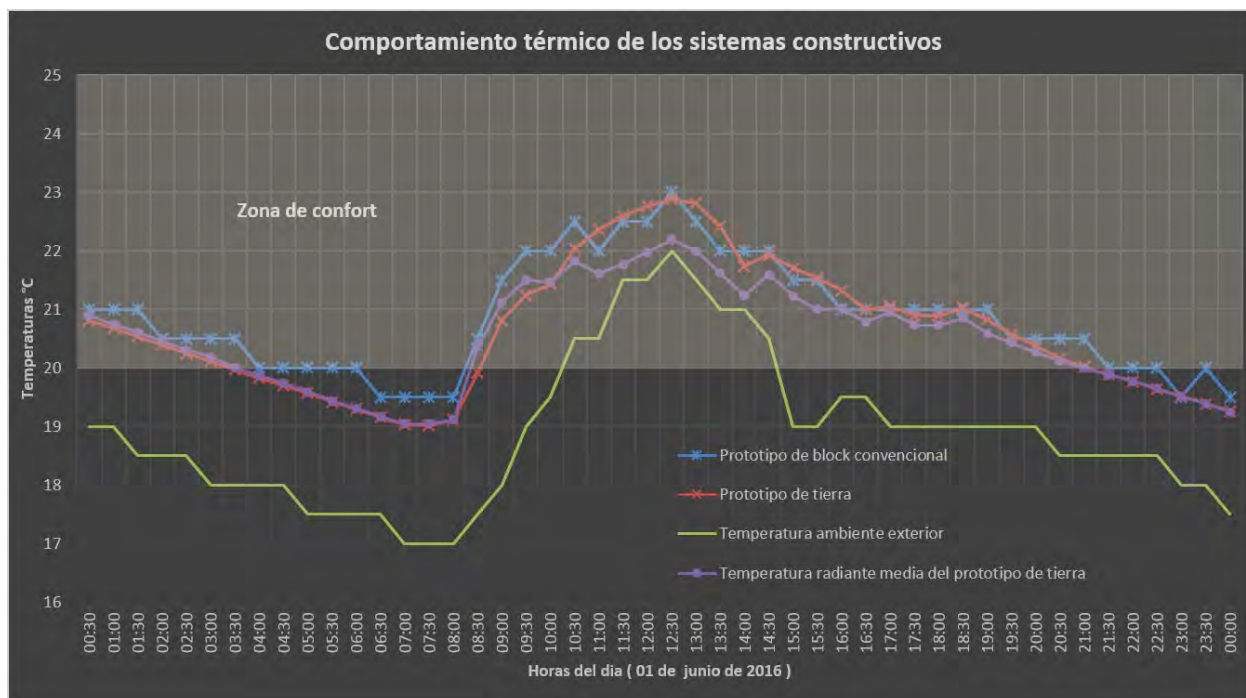


Figura 117. Comportamiento térmico de ambos prototipos, temperatura exterior y temperatura de globo en el prototipo de tierra para el día 01 de junio de 2016.

7.10 APLICACIÓN DE ENCUESTAS PARA DETERMINAR LA SENSACIÓN TÉRMICA DE LOS OCUPANTES EN AMBOS PROTOTIPOS.

Con la finalidad de comprobar nuestras hipótesis respecto a la temperatura radiante media y su afectación en la sensación térmica de los ocupantes, se hizo un ejercicio en donde se realizó una encuesta a treinta personas de distintas edades, diferente sexo y distinta condición corporal.

El ejercicio consistió en registrar la sensación térmica de los participantes antes de ingresar a los prototipos, una vez obtenido este dato, se hizo pasar a cada participante en alguno de los prototipos sin que el participante supiera a qué prototipo estaba ingresando, es decir, si era de BCC o si era de TVC. Una vez que el participante estaba adentro de algún prototipo, se hacía esperar por un tiempo de 10 minutos y después de este tiempo se registraba su sensación térmica. Después de esto se sacaba al participante del prototipo para registrar ahora su sensación térmica del exterior después de haber estado en el interior de algún prototipo.

Cabe mencionar que las encuestas se hicieron en un solo día, con condiciones climatológicas aparentemente buenas, es decir, soleado con un poco de nubosidad y viento apreciable, con una temperatura ambiente exterior de 20°C, una temperatura interior en el prototipo de BCC de 24°C,

temperatura interior en el prototipo de tierra de 22°C y en este mismo prototipo pero en el termómetro de globo con una temperatura de 22.8°C.

A continuación se muestra el formato de encuesta utilizado para nuestro ejercicio.

Encuesta para la determinación de la sensación térmica de los ocupantes en los prototipos						
Fecha:		Hora de inicio:		Hora de finalización:		
Nombre:					Sexo:	
Edad:	Peso:		Estatura:			
Grado de arropamiento						
Muy ligero (CLO)	Ligero (CLO)		Medio (CLO)		Pesado (CLO)	
Ropa de verano como short, playera ligera sin mangas o vestido ligero	Pantalón mezclilla con playera de algodón o blusa casual de algodón		Mezclilla o vestir, playera o camisa y suéter / sudadera / chamarra rompe vientos		Ropa pesada de invierno, chamarra, pants de algodón, botas pesadas	
Sensación térmica						
Previo al ingreso al prototipo Prototipo Tierra () Prototipo Block convencional ()						
1 ¿Cómo se siente usted en este momento? (a los 2 minutos)						
Mucho frío	Frio	Algo de frio	Ni frio ni calor	Algo de calor	Calor	Mucho calor
2 Una vez que se ingresa al prototipo y se está allí por el tiempo determinado. (a los 10 min)						
¿Cómo se siente usted en este momento?						
Mucho frío	Frio	Algo de frio	Ni frio ni calor	Algo de calor	Calor	Mucho calor
3 Ahora inmediatamente al salir, ¿Se siente mejor térmicamente aquí adentro del prototipo o allá afuera?						
Afuera			Adentro			
Temperatura interior en ese momento			Humedad relativa			
Temperatura de globo			Humedad relativa			
Temperatura exterior en ese momento			Humedad relativa			

Figura 118. Modelo de encuesta que se utilizó para determinar la sensación térmica de los ocupantes en ambos prototipos.

Después de haber realizado las encuestas y haber recopilado la información se obtuvieron los siguientes resultados:

Prototipo de block de concreto convencional (BCC)

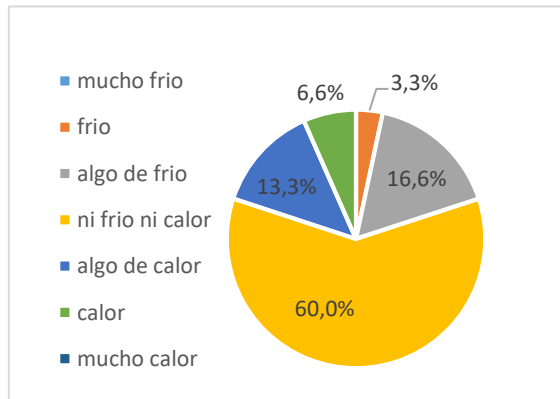


Figura 119. Sensación térmica de los ocupantes antes de entrar al prototipo.

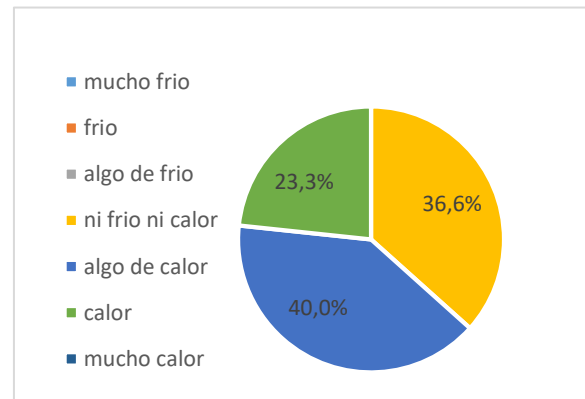


Figura 120. Sensación térmica de los ocupantes dentro del prototipo de BCC.

Prototipo de tierra vertida compactada (TVC)

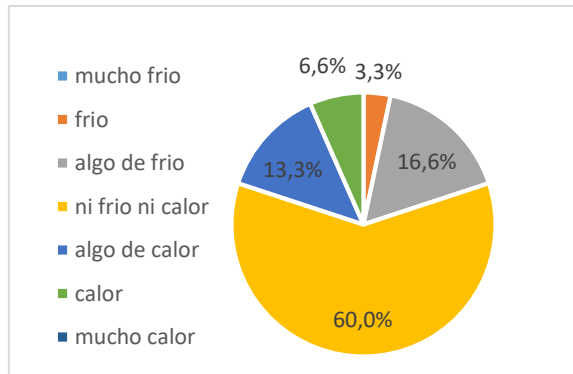


Figura 121. Sensación térmica de los ocupantes antes de entrar al prototipo.

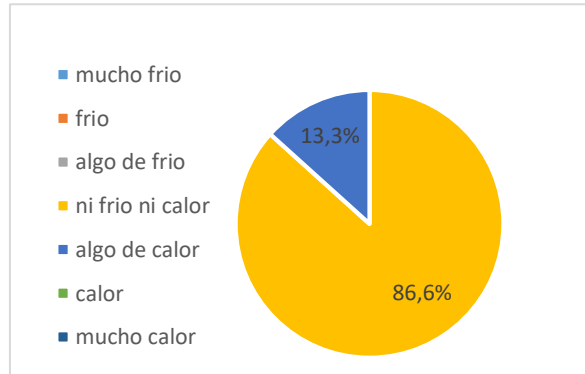


Figura 122. Sensación térmica de los ocupantes dentro del prototipo de TVC.

Los resultados obtenidos con la aplicación de las encuestas demuestran que el sistema constructivo de tierra vertida compactada (TVC) mejora las condiciones térmicas respecto al módulo de block de concreto convencional (BCC). Podemos observar que antes de ingresar al prototipo de BCC (Ver Figura 119), el 60% de las personas no sentía ni frío, ni calor, es decir se sentía en cierto confort con las características climáticas que había en el exterior en ese momento, un 16.6% tenía algo de frío, mientras que el 13.3%

sentía, algo de calor. Podemos deducir que por los datos obtenidos, el clima se presentaba templado, sin embargo, una vez que ingresaron al prototipo de BCC, la mayoría de las personas que no sentían ni frío ni calor, ahora pasó a un estado en el que tenía algo de calor, con un 40%, el 60% de los ocupantes que no sentía ni frío ni calor, en el interior del prototipo de BCC ahora solo era el 36.6%, y del 6.6% que decía sentir calor ahora un 23.3% lo sentía, podemos concluir que el prototipo de BCC aumentó la sensación térmica de los ocupantes, elevando el porcentaje de personas que sentían estar en dis confort, (Ver Figura 120). Por otro lado, del 60% de personas que su respuesta respecto a la sensación térmica del exterior fue, ni frío ni calor, al ingresar al prototipo de TVC ahora aumento significativamente a un 86.6% y el 13.3% que decía tener calor antes de entrar al prototipo de TVC se mantuvo, concluyendo entonces que el prototipo de TVC mejoró las condiciones de sensación térmica respecto al exterior, (Ver Figura 122). De esta manera podemos tener más claras las ventajas de utilizar un sistema constructivo de TVC comparado con un sistema de BCC.

7.11 VENTAJAS ECONÓMICAS DE LA PROPUESTA CON TIERRA VERTIDA COMPACTADA

Como ya se mencionó anteriormente, la construcción de ambos prototipos se hizo con materiales propios de la región, adaptando la tierra y la madera tanto en techos como en puertas y ventanas, materiales típicos y muy económicos con grandes ventajas sustentables que propician un bajo consumo energético, un bajo costo de construcción y una mejor calidad térmica.

A continuación se muestra la Tabla 7, en donde podemos ver los materiales con los que fueron hechos los prototipos y el costo de la construcción de cada uno de ellos.

Como se puede ver en la tabla , el costo de construcción del prototipo de tierra vertida compactada es un 40% más económico que el prototipo hecho con block de concreto convencional, esto se debe a que la tierra con la que está hecho el prototipo de tierra está tomada del mismo sitio donde fueron contruidos los prototipos, por lo tanto, no tiene costo alguno, a diferencia del prototipo de block convencional, en donde el costo de cada block lleva consigo el costo de fabricación, almacenado, transporte y venta de cada pieza. Otras partidas que incrementan el costo del prototipo de block convencional y lo hacen más caro respecto al de tierra, son los materiales empleados para el pegado de los blocks y sin duda el tiempo de construcción es mayor. Es importante aclarar que en este análisis no se están incluyendo los costos de la pintura natural que se le aplicó a ambos prototipos, ya que se hizo de manera sustentable ocupando cal natural, agua y mucilago de nopal, (abundante en la región) y lo más importante, sin costo alguno, con mayores ventajas térmicas y con un bajo impacto ecológico respecto a pinturas convencionales industrializadas.

Tabla 7. Análisis de costos de ambos prototipos.

Partidas / Materiales	Prototipo de tierra vertida compactada		Prototipo de block convencional	
	Cantidad	Precio	Cantidad	Precio
Nivelacion del terreno	4.5 m ³	680 pesos	4.5 m ³	680 pesos
Block de concreto	-----	-----	600 pzs.	2,703 pesos
Tierra cruda	15 m ³	-----	0.9 m ³	-----
Mortero cemento arena	-----	-----	0.5 m ³	765 pesos
Arena	-----	-----	4 m ³	901 pesos
Cal	4 pzs.	187 pesos	8 pzs.	374 pesos
Puerta de madera	1 pz.	459 pesos	1 pz.	459 pesos
Ventana de madera con cristal de 4mm de espesor	2 pzs.	1768 pesos	2 pzs.	1768 pesos
Vigas de madera de 10 cm de diámetro por 4 m de largo	5 pzs.	255 pesos	5 pzs.	255 pesos
Costera de madera acerrada	10 m ³	493 pesos	10 m ³	493 pesos
Mano de obra (dos personas)	21 días	6,885 pesos	28 días	9,180 pesos
Costo total por cada prototipo		10,727 pesos		17,578 pesos

7.12 BENEFICIOS AMBIENTALES DE LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA CRUDA

Son múltiples los beneficios que giran en base a una construcción con tierra cruda en la que se descarta el uso de quema de combustible para su elaboración, el uso de transporte motorizado y los procesos industriales implícitos en muchos de los sistemas constructivos convencionales, y estos beneficios o afectaciones que cada sistema constructivo genera para ser elaborado se puede obtener a través de la huella de carbono.

La Huella de Carbono es una medida del impacto de todos los Gases de Efecto Invernadero (GEI) producidos en una actividad, producto o servicio.

El concepto de Huella de Carbono abarca todo el ciclo de vida, desde la cuna (concepción del edificio) hasta la tumba (demolición del edificio) Es decir, en el caso de la construcción abarca desde la energía o recursos ocupados al extraer alguna materia prima como piedras, tierras, maderas, cal y cemento, o la energía ocupada para fabricar algún material procesado ocupado en la construcción, los gases GEI emitidos durante la construcción del edificio y además los utilizados durante la vida útil del edificio y abarcando así hasta los generados por la demolición del mismo.

El inventario de GEI tiene en cuenta las emisiones de siete Gases de Efecto Invernadero.

-Dióxido de Carbono (CO_2),

-Metano (CH_4),

-Óxido nitroso (N_2O),

-Hidrofluorocarbonos (HFC_s),

-Perfluorocarbonos (PFC_s),

-Hexafluoruro de azufre (SF_6)

-Trifloruro de nitrógeno (NCl_3).

Para que las Huellas de Carbono sean comparables entre sí, se creó una unidad internacional: el dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}), que tiene en cuenta el potencial de efecto invernadero de estos gases.

¿Por qué se toma como referente el CO_2 para globalizar a los demás GEI?

Porque el CO_2 contribuye con más del 80% en los GEI que provocan el calentamiento global en el planeta, posteriormente el metano con un 7% y el óxido nitroso con un 6%, estos GEI provocan en el planeta una barrera que permite pasar los rayos que vienen del sol hacia el interior del planeta, dotándonos del calor diario del sol, pero no permiten que los objetos que se calientan dentro del planeta regresen ese calor

hacia el exterior del planeta, calentado cada día más la temperatura interior del planeta y simulando así un efecto invernadero a nivel global, estimando este aumento de temperatura en un 0.7 °C en los últimos cien años y haciendo más inestable el clima en las distintas regiones del planeta, dejándonos a los seres vivos en desventaja para poder adaptarnos rápidamente a estos cambios drásticos.

Algo muy importante que debemos considerar en nuestra vida cotidiana si queremos disminuir este calentamiento global es conocer de manera general que huella de carbono tienen nuestras acciones diarias y cuáles son las alternativas sustentables que podemos implementar para aminorar dicha huella. Por ello, la importancia de construir con materiales naturales de bajo impacto ecológico y que sean reutilizables como la tierra cruda. A diferencia de los materiales semi industrializados, la tierra tiene cero impactos de CO₂ a la atmósfera, ya que su extracción se hace de manera manual, con herramientas no tecnificadas y además no se emite ningún tipo de gas a la atmósfera debido a su transportación, ya que utilizado de manera eficaz es un sistema constructivo que nos permite extraer la tierra del mismo sitio donde se utilizará sin ocupar algún medio de transporte que tenga alguna emisión de GEI.

Actualmente existen múltiples herramientas que nos ayudan a tener un acercamiento certero del impacto que tienen nuestras acciones sobre la atmósfera causado por la emisión de GEI, estas herramientas son un servicio gratuito que distintas instituciones han desarrollado para hacer consciencia del impacto ambiental que tiene nuestro estilo de vida y así poder evitar o disminuir aquellas que más impacto tengan, priorizando nuestras actividades sin descontrolar la forma de vida que llevamos pero si optimizando aquellas con mayor contribución de GEI.

Nos dimos a la tarea de buscar cual es la energía incorporada de los materiales que se utilizaron para ambos casos y así poder sustentar uno de los beneficios de construir con tierra, (Ver Tablas 8 y 9). La energía incorporada de los materiales de construcción hace referencia a la energía consumida en todas las fases del ciclo de vida del producto, desde la extracción de la materia prima para su elaboración, refinación o transformación de la materia prima, su comercialización, su utilización descomposición y hasta la energía utilizada en la adecuación para la reutilización y el reciclaje.

Sin embargo para efectos de este ejercicio en el que solamente es un acercamiento técnico de las ventajas ambientales que implica el construir con tierra cruda, se omitieron muchos factores que enriquecen sin duda la investigación pero que también dejan de ser relevantes para nuestro caso de estudio, tal es caso de la energía incorporada por transportación de los materiales, la energía incorporada en la extracción de la tierra, que en este caso se hizo manualmente y en el mismo predio, se despreciaron también algunos elementos como el agua y el trabajo físico.

Tabla 8. Tabla de energía implícita de los materiales utilizados en la construcción del prototipo de BCC, elaboración basada en las tablas de (Wooley et al, 1997) (Vale, 1991) (Daumal et al, 1978) (Roodman et al, 1995) Edwards, 1999) (Mazria, 1979)

Prototipo hecho con Block de concreto convencional (BCC)			
Materiales utilizados	Cantidad en Kg o Pzas en el caso del block	Energía incorporada kWh/kg	Subtotal kWh
Block de concreto	510	4.5 por block	2295
Cal	100	1.5	150
Cemento	100	2.0	200
Arena	1920	0.02	38
Madera	693	0.5	356
Vidrio	33.7	7.0	236
Teja	360	4.4	1440
Total			4,715.0
CO₂			2.18 toneladas

Tabla 9. Tabla de energía implícita de los materiales utilizados en la construcción del prototipo de TVC, elaboración basada en las tablas de (Wooley et al, 1997) (Vale, 1991) (Daumal et al, 1978) (Roodman et al, 1995) Edwards, 1999) (Mazria, 1979)

Prototipo hecho con Tierra Vertida Compactada (TVC)			
Materiales utilizados	Cantidad en Kg	Energía incorporada kWh/kg	Subtotal kWh
Tierra	11250	0.00	0
Cal	100	1.5	150
Cemento	100	2.0	200
Arena	1920	0.02	38
Madera	693	0.5	356
Vidrio	33.7	7.0	236
Teja	360	4.4	1440
Total			2,420
CO₂			1.12 toneladas

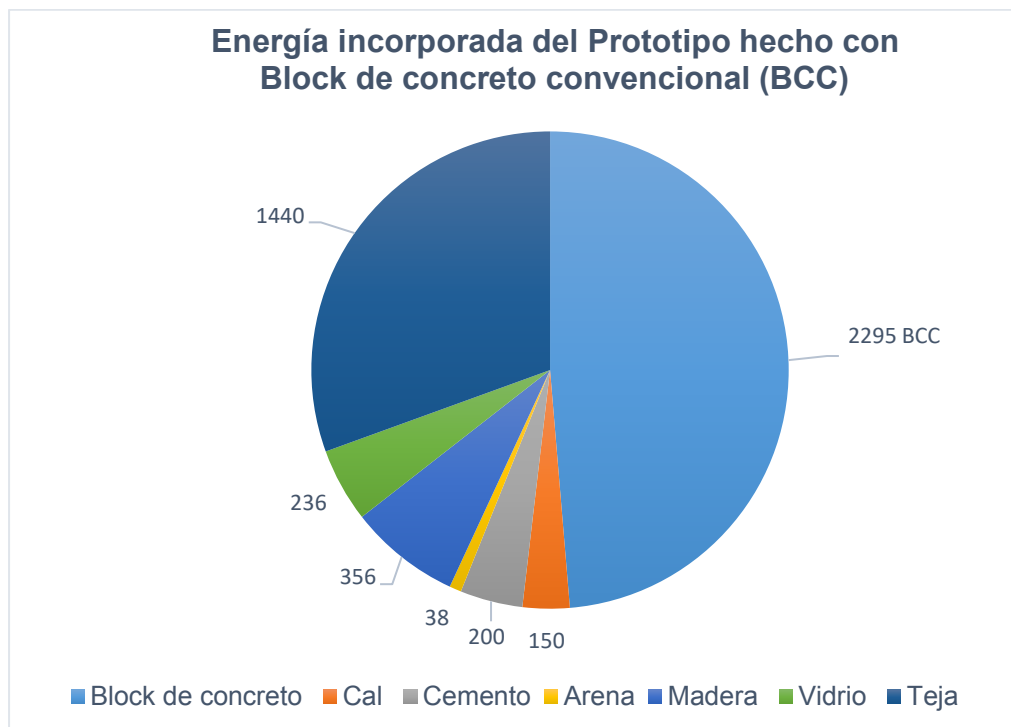


Figura 123. Energía incorporada en el prototipo hecho con block de concreto convencional.

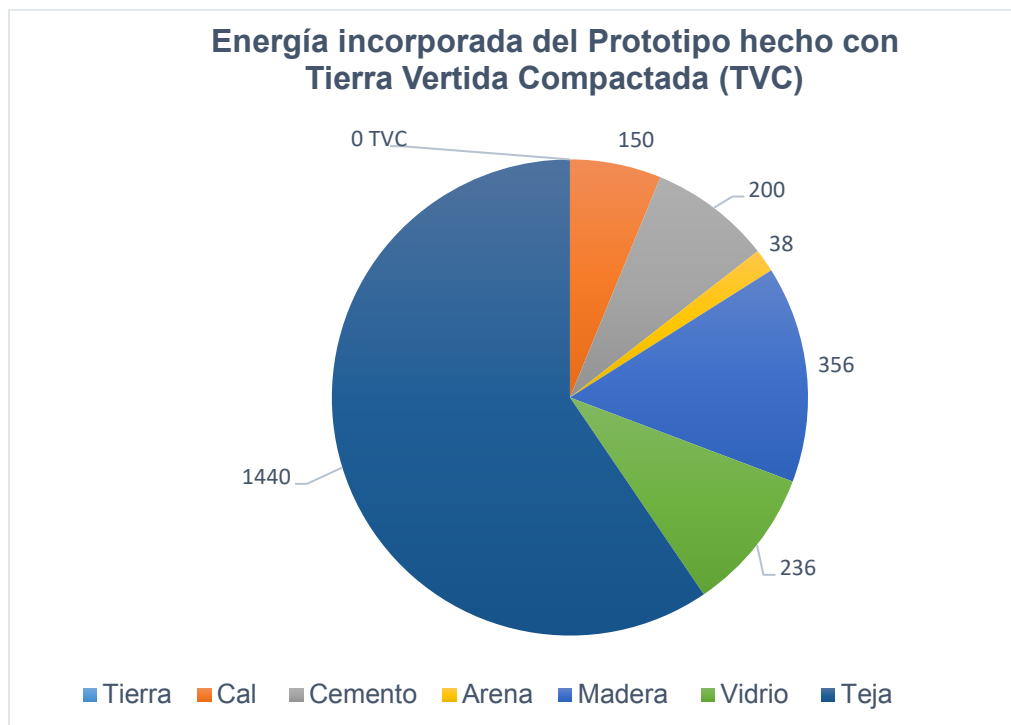
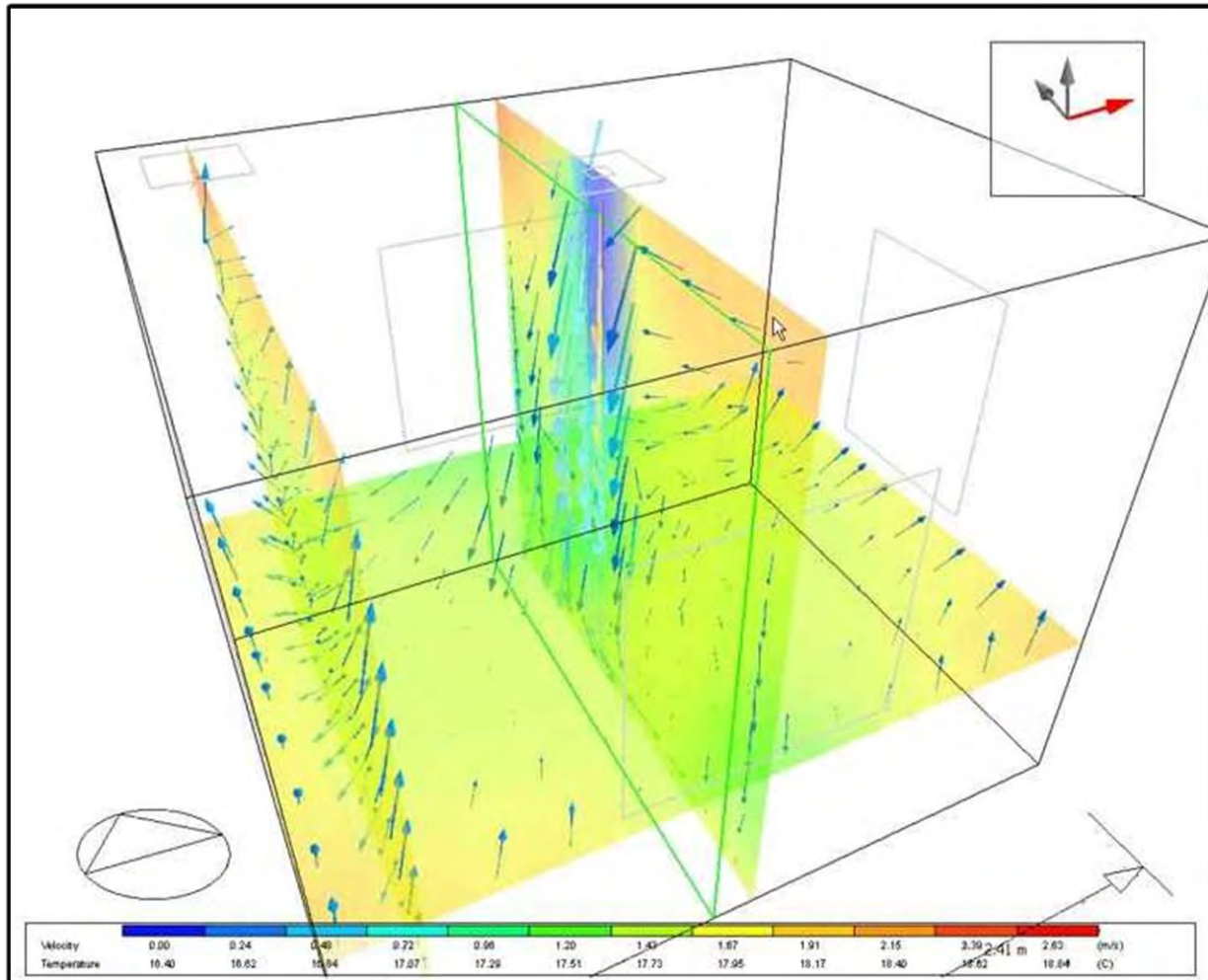


Figura 124. Energía incorporada en el prototipo hecho con tierra vertida compactada.

Así, de manera muy sencilla podemos apreciar que cada uno de los materiales usados en construcción tiene un costo ambiental y mucha energía implícita que en algún tiempo y lugar del ciclo de vida de ellos se está consumiendo, (ver figuras 123 y 124). A través de la cantidad de CO₂ que genera cada uno de los espacios construidos podemos deducir que el costo ambiental de construir muros con tierra es de casi un 50% menos respecto al prototipo de block de concreto convencional. Creemos fielmente que la construcción con materiales locales, naturales y de baja energía implícita son parte de toda una serie de factores que nos ayudan a mitigar la emisión de GEI a la atmósfera y con ello disminuir el calentamiento global. Son nuestras acciones y principalmente nuestras decisiones como arquitectos las que se deben nutrir con este tipo de conocimientos para que día con día se mejore la conceptualización de los proyectos enfocándolos hacia proyectos más sustentables, eficientes y confortables.

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS TÉRMICO CON HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN (DESIGN BUILDER)



8 CAPÍTULO 8 ANÁLISIS TÉRMICO CON DESIGN BUILDER

8.1 HERRAMIENTAS DIGITALES DE ANÁLISIS TÉRMICO

El análisis térmico de un edificio a través de las herramientas digitales es una forma de conocer el comportamiento térmico de un espacio mediante algún software especializado en la simulación ambiental y energética de los edificios. Hoy en día, estas herramientas de simulación se han convertido en un gran auxiliar para quien decide indagar de forma un tanto precisa en el comportamiento térmico de los espacios arquitectónicos. En nuestro caso recurrimos a Design Builder, un programa de simulación energética que integra el motor de cálculo desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) el cual se caracteriza por evaluar aspectos como los niveles de confort, los consumos de energía y las emisiones de CO₂, además de que permite evaluar las implicaciones económicas del desempeño ambiental y energético de los edificios, considera los costos de construcción, los costos de la energía y los costos asociados al ciclo de vida de los edificios.



8.1.1 Ventajas y desventajas de las herramientas digitales

Puesto que las herramientas digitales para la simulación térmica de los edificios son herramientas que aún siguen desarrollándose, el uso de ellas debe considerarse solamente como un apoyo para el desarrollo de los proyectos en los que se desee integrar un análisis térmico. Por ello mencionamos aquí algunas de las ventajas y desventajas que creemos se deben tomar en cuenta antes de comenzar a ocupar la herramienta.

Ventajas

1. Podemos conocer los consumos energéticos que va a tener el edificio real, pudiendo actuar sobre el mismo antes de la construcción, con las ventajas económicas que esto supone.
2. Podemos detectar cuáles son las causas de algún fenómeno térmico en nuestras construcciones ya existentes o en proyectos que aún no se han hecho.
3. A través del modelado asistido por computadora podemos experimentar cuales son las causas-efectos térmicos que tendrán los elementos de diseño que nosotros mismos propongamos en el anteproyecto.
4. Podemos hacer un análisis térmico horario, mensual o anual de nuestros proyectos.

5. Podemos hacer una comparativa del comportamiento térmico entre dos sistemas constructivos o entre dos materiales y adaptar el más óptimo en el anteproyecto.

Desventajas

1. Debido a que no existen referencias de datos climáticos en todos los lugares del mundo, los datos climáticos que muchas veces utilizamos para hacer el análisis termo-energético los obtenemos de manera estocástica mediante algún otro software como Meteonorm, es decir, interpolando dos puntos cercanos a la ubicación del proyecto y así obtenemos un acercamiento de las condiciones climáticas que se utilizarán para el análisis térmico. Sin embargo estos datos climáticos interpolados tienen ciertas irregularidades respecto a los datos reales del sitio, proporcionando entonces solo un acercamiento a la realidad de lo que sería dentro del análisis, la influencia del clima en el comportamiento termo-energético de los edificios.
2. La correcta selección de los materiales que ocuparemos dentro del software es un determinante en los resultados que obtendremos al hacer el análisis. Por ello, es necesario conocer perfectamente cuales son las características térmicas de nuestros materiales y ejecutarlos en el programa de manera correcta. Sin embargo, cuando el material que queremos simular no existe dentro del software, ocupamos algún material que se asemeje a lo que en la realidad estaríamos utilizando, estas diferencias crean variaciones en los resultados respecto a las que en la realidad se obtendrían.
3. El software de Design Builder no permite crear formas arquitectónicas tan complejas, por ende, si simplificamos la forma de nuestro edificio u omitimos elementos arquitectónicos complejos, estaríamos alejando de la realidad el análisis termo-energético.

8.2 ANÁLISIS TÉRMICO DE LOS PROTOTIPOS CON LA HERRAMIENTA DESIGN BUILDER

Una vez que tenemos claras las ventajas y desventajas de usar herramientas digitales en el análisis termo-energético de los espacios, decidimos hacer una comparativa del análisis térmico arrojado por la herramienta Design Builder, comparando el comportamiento térmico de los prototipos en distintos lugares de la república mexicana, se eligió la ciudad de Chihuahua, Chihuahua y la ciudad de Villahermosa Tabasco, (Ver Tabla 10). El propósito de dicho experimento es hacer un análisis comparativo para obtener de manera más precisa las ventajas térmicas del uso de la tierra en muros, creemos que eligiendo dos sitios con una gran oscilación térmica y condiciones climáticas más severas, las ventajas de los sistemas constructivos se harán más evidentes que en el clima del sitio propuesto.

Tabla 10. Datos climáticos de Aquixtla, Chihuahua y Villahermosa.

Datos climáticos de los lugares donde se hará la simulación térmica de los prototipos			
Sitio	Aquixtla, Puebla	Chihuahua, Chihuahua	Villahermosa, Tabasco
Estación meteorológica	00021008	00008165	00027054
Latitud	19° 47'44'' N	28° 38'00'' N	17° 59'48'' W
Longitud	97° 56'08'' W	106° 05'00'' W	92° 55'42'' W
Altitud	2192 msnm	1428 msnm	24 msnm
Temperatura media normal	15.7 °C	18.7 °C	27.1 °C
Temperatura mínima normal	10.3 °C	10.8 °C	22.3 °C
Temperatura máxima normal	21.1 °C	26.6 °C	31.9 °C
Precipitación normal	727.9	371.8	1959.7
Evaporación total anual	1515.3	2188.3	1507.2
Mes más frío	Enero (13°C)	Enero (10.3°C)	Enero (23.6°C)
Mes más caluroso	Mayo (18.2°C)	Junio (26.8°C)	Mayo (29.6°C)

Se hizo el modelado del experimento en Design Builder, respetando las condiciones con las que se construyeron los prototipos, es decir, se modelaron dos módulos experimentales de igual dimensión interior, mismos espesores de los muros, mismas alturas interiores, mismos materiales utilizados en puertas, ventanas, techos, repellados, la única condición distinta fue el material de los muros de 19 cm de espesor. En un prototipo los muros fueron propuestos de TVC y en el otro de BCC.

Estas condiciones fueron completamente iguales a las que se aplicaron en los módulos experimentales hechos de manera real.

8.3 ANÁLISIS TERMO-ENERGÉTICO DEL EXPERIMENTO EN DISTINTOS CLIMAS DE NUESTRO PAÍS; AQUIXTLA, PUEBLA. CHIHUAHUA, CHIHUAHUA Y VILLAHERMOSA TABASCO.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas del análisis térmico de Design Builder para los meses de Enero y Mayo, meses representativos para la temporada de bajo calentamiento y la época de calor.

Como podemos observar en las Figuras 125 y 126, el comportamiento térmico en la localidad de Aquixtla para el mes de Enero (época de bajo calentamiento) es muy similar para ambos prototipos, las diferencias que se logran observan no superan los 0.5°C , sin embargo podemos ver que para el mes de Mayo (época de calentamiento) (Ver Figuras 127 y 128) el comportamiento térmico presenta algunas otras diferencias, encontramos diferencias de 1°C o en algunos casos menos de 1°C de diferencia.

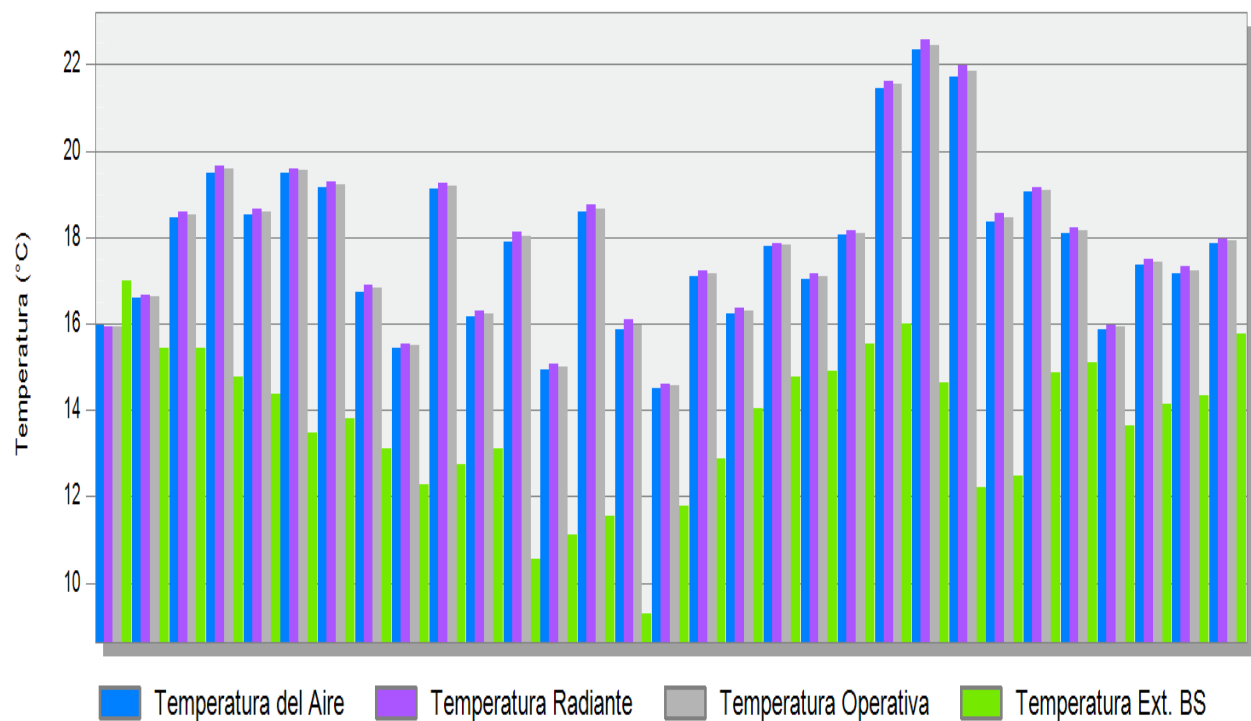


Figura 125. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Aquixtla, Puebla.

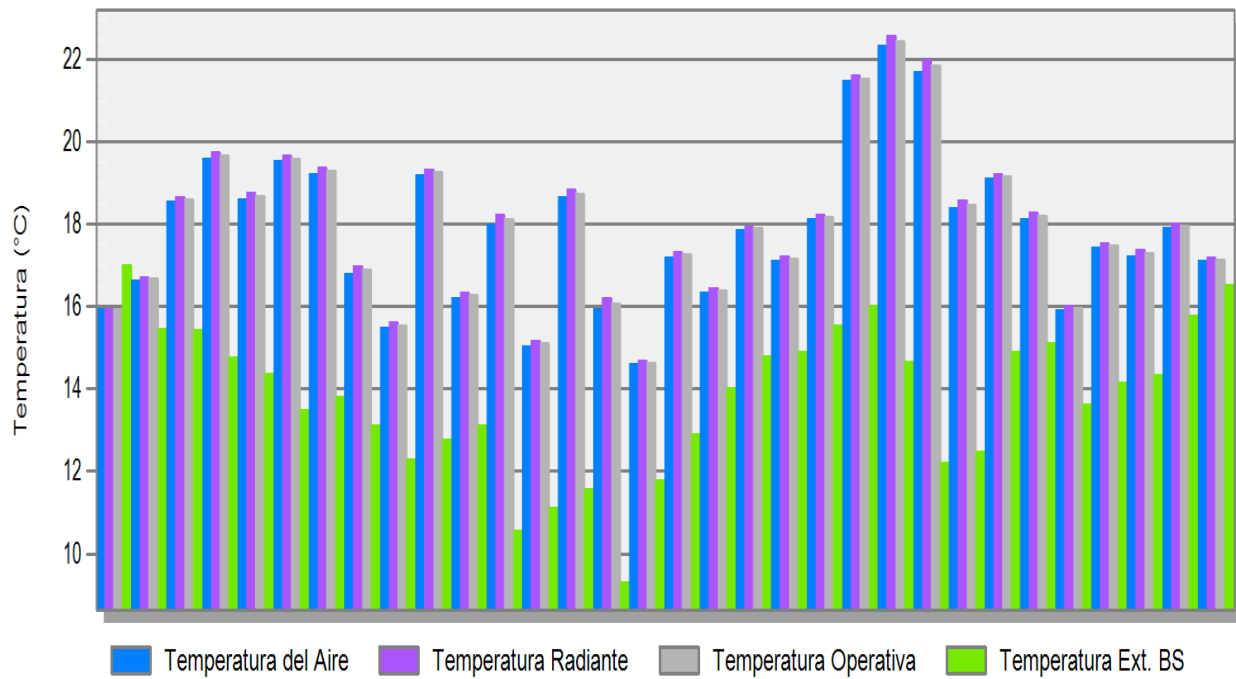


Figura 126. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Aquixtla Puebla.

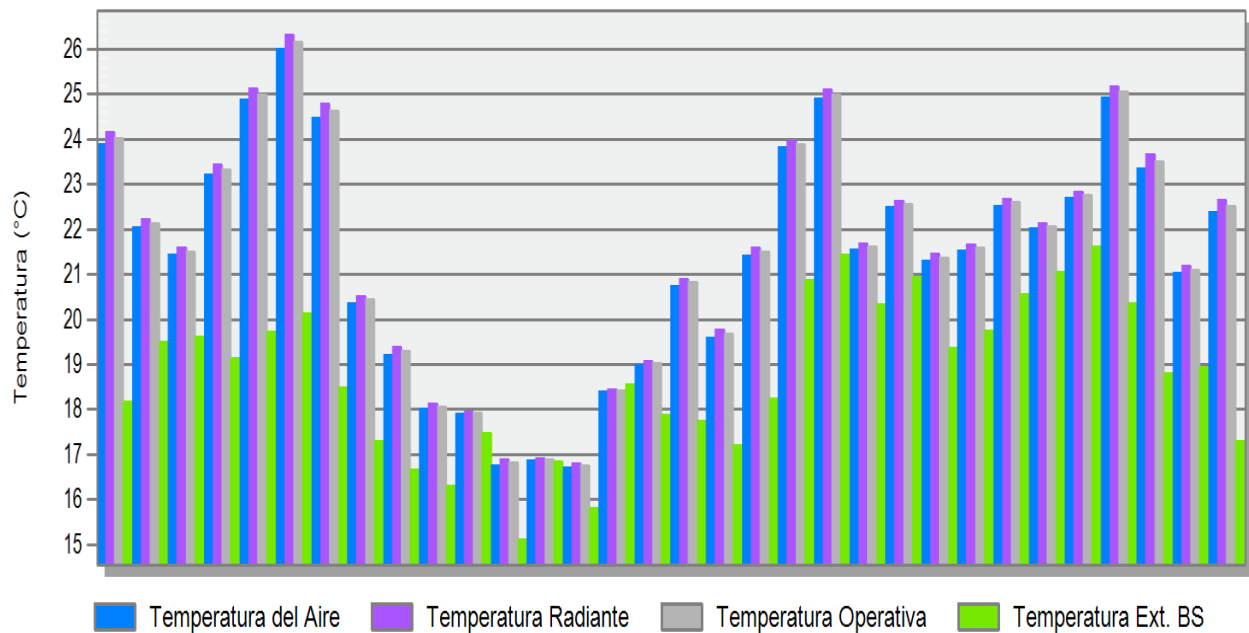


Figura 127. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Aquixtla Puebla.

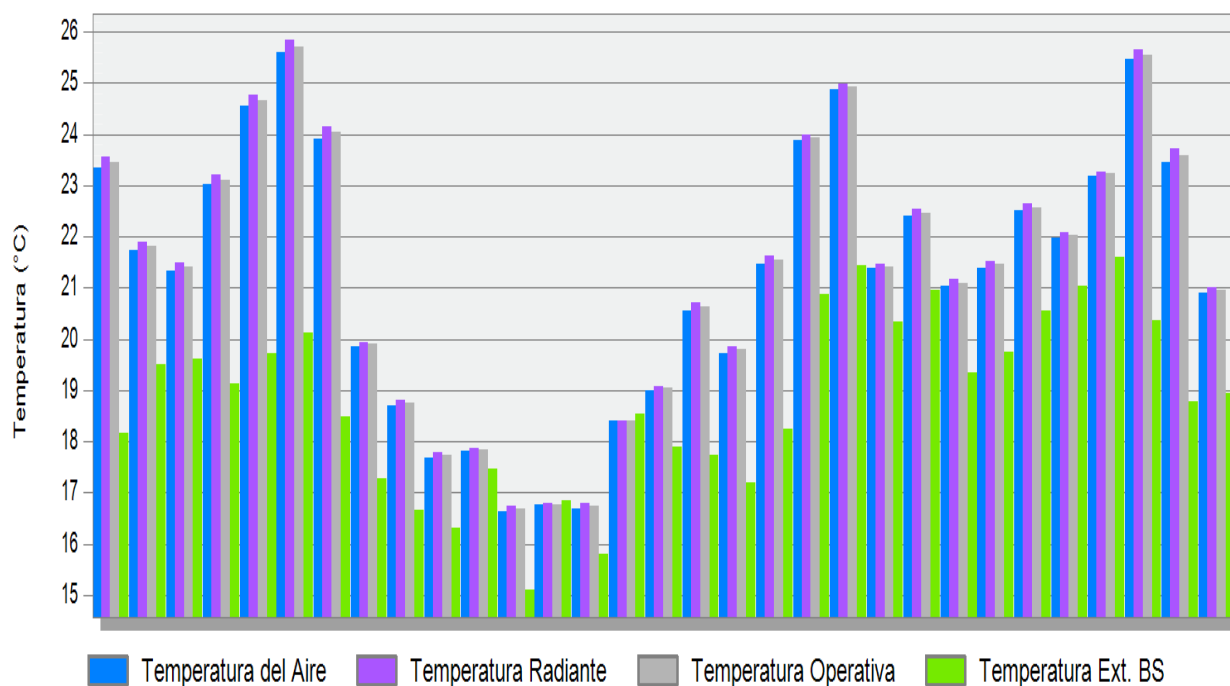


Figura 128. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Aquixtla Puebla.

Podemos observar que para la temporada cálida, el prototipo de Block de concreto convencional BCC presenta una temperatura mayor que el prototipo de Tierra vertida compactada TVC, esto provoca cierto dis confort en los ocupantes como lo pudimos ver en las encuestas aplicadas. Otro fenómeno que podemos observar en las Figuras 127 y 128 es que para la temporada calurosa representada por el mes de mayo; la diferencia o amortiguamiento térmico de los sistemas constructivos es mucho mayor que la que se presenta en la época de bajo calentamiento, podemos ver en las gráficas 127 y 128 un amortiguamiento térmico de 6, 7 y hasta 8 °C, por el contrario en las gráficas 125 y 126 el amortiguamiento térmico es de 2, 3 y 4 °C. A mediados de mes de Mayo, se registraron días fríos por debajo de los 17°C, el día siguiente a estos días, se representa con un día templado, con una temperatura por arriba de los 18°C, con esto, se acentúa la importancia de la masa térmica, en donde en tal día templado, la temperatura exterior es mayor que la temperatura interior de los prototipos, correspondiendo este fenómeno al tiempo que tarda en pasar el calor exterior hacia el interior a través de los muros.

Posteriormente se hizo el análisis térmico de ambos prototipos, BCC y TVC pero en la localidad de Chihuahua Chih. y se eligieron nuevamente los meses representativos de las diferentes épocas climáticas (Enero y Mayo) Sin embargo, a pesar de que Chihuahua presenta un clima con mayor oscilación térmica, las diferencias térmicas entre ambos prototipos siguen siendo similares, incluso podemos observar en las Figuras 129 y 130 que el prototipo de TVC presenta temperaturas más bajas que el prototipo de BCC, estas diferencias no rebasan 1°C, sin embargo, si a las gráficas se les colocara la franja que define la zona de

confort para Chihuahua, podríamos ver que el prototipo de BCC presenta condiciones ligeramente más favorables que el de TVC para el mes de Enero.

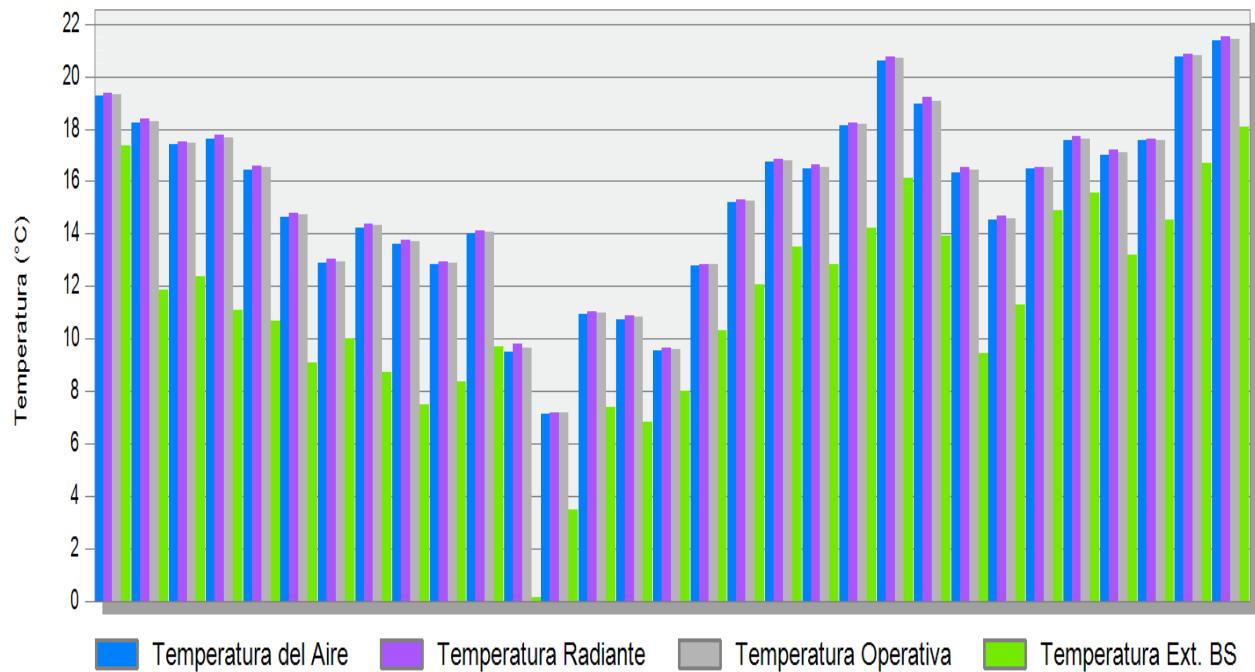


Figura 129. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Chihuahua Chih.

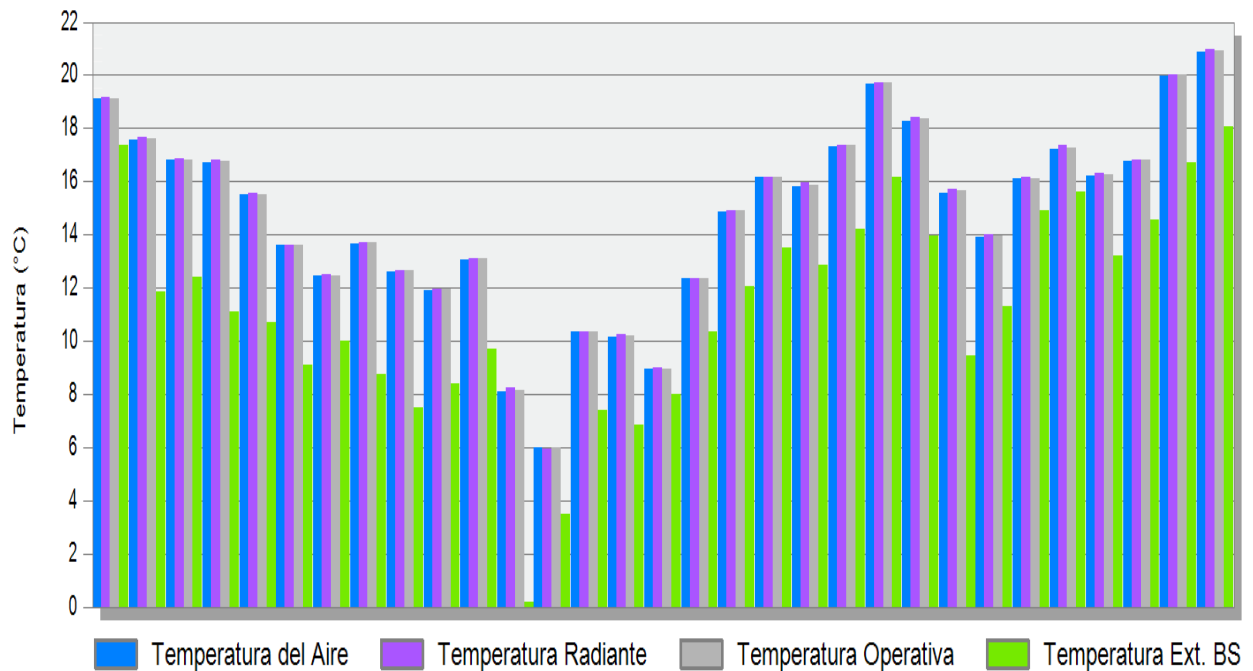


Figura 130. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Chihuahua Chih.

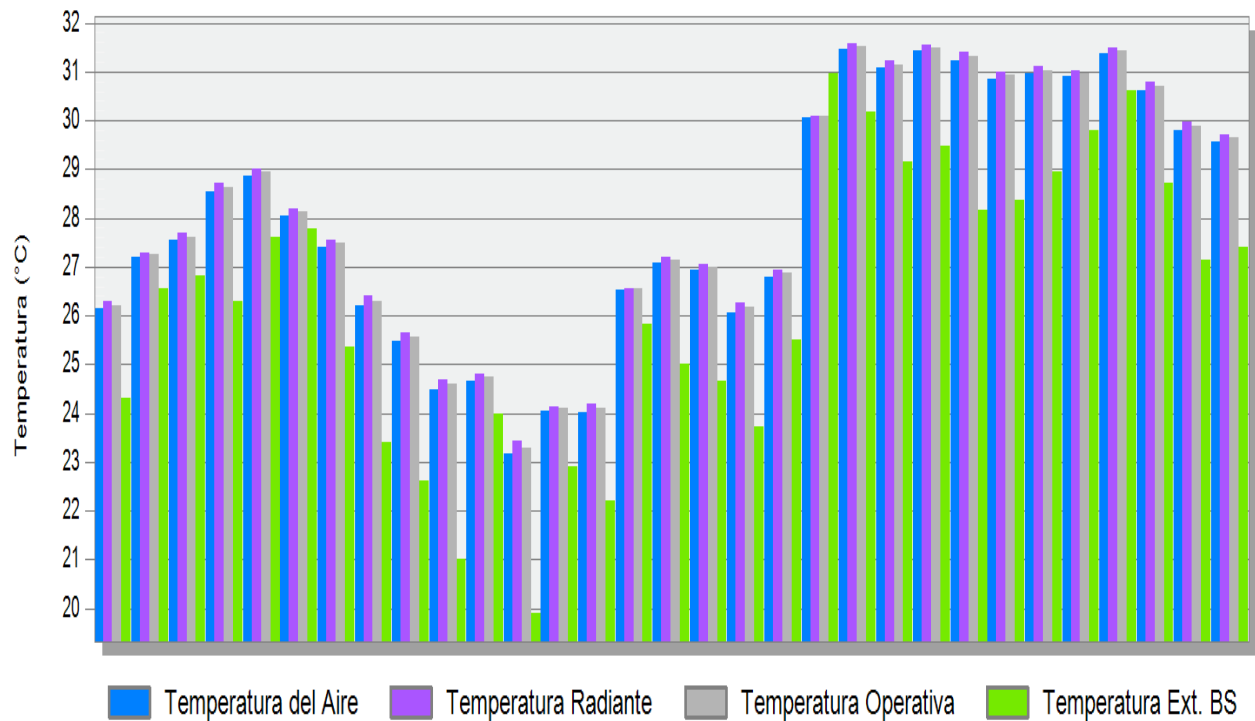


Figura 131. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Chihuahua Chih.

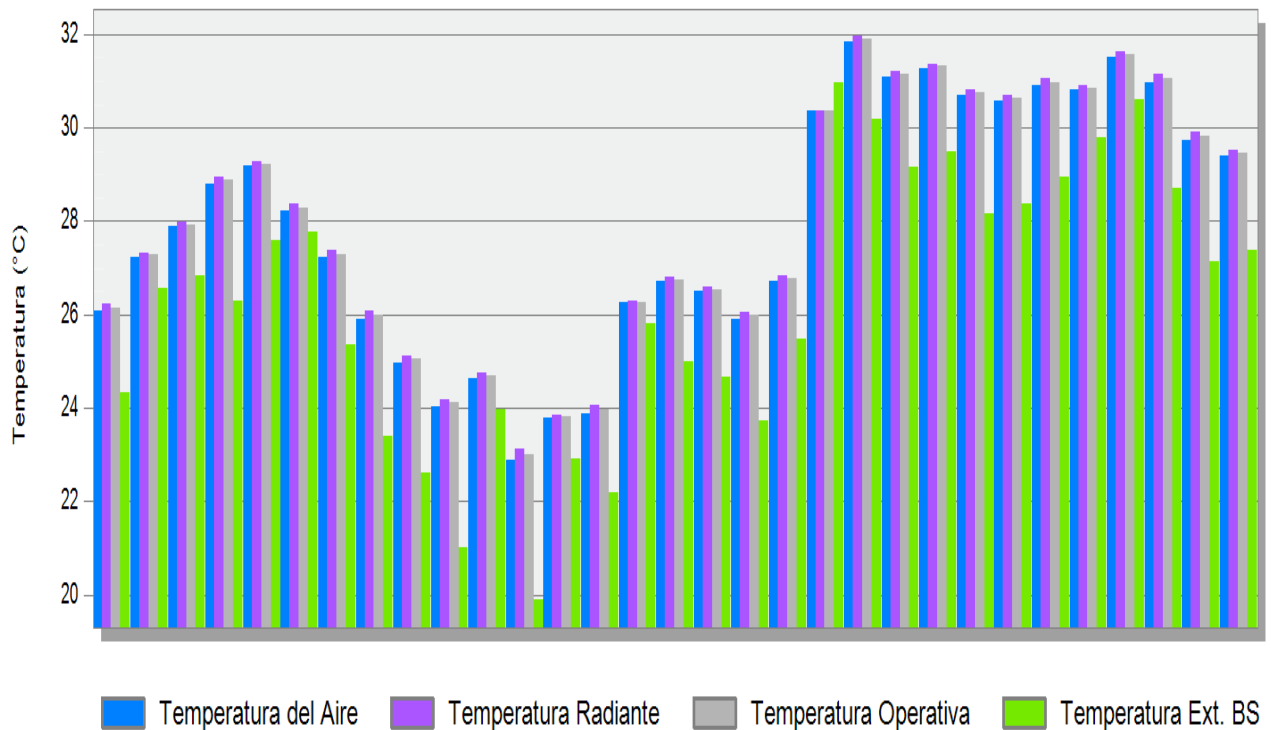


Figura 132. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Chihuahua Chih.

El mismo ejercicio se realizó para la ciudad de Villahermosa Tabasco, en donde la temperatura media anual es de 27.1 °C, estando 11.4°C por encima de la Temperatura media anual de Aquixtla y 8.4°C por encima de la TMA de Chihuahua. Como se puede observar en las gráficas 133 y 134 correspondientes a los meses de enero para los prototipos de BCC y TVC respectivamente, la temporada de bajo calentamiento para la Ciudad de Villahermosa por un lado presenta días con una temperatura cercana a los 32°C y por otro lado algunos días con temperaturas cercanas a los 20°, sin embargo, la mayoría de los días se encuentran entre los 26°C y los 30°C. Podemos ver que el prototipo de TVC presenta mejores condiciones térmicas que el prototipo de BCC, si ponemos atención en los 4 primeros días de enero, podemos deducir que el prototipo de TVC presenta 1°C menos de temperatura respecto al prototipo de BCC.

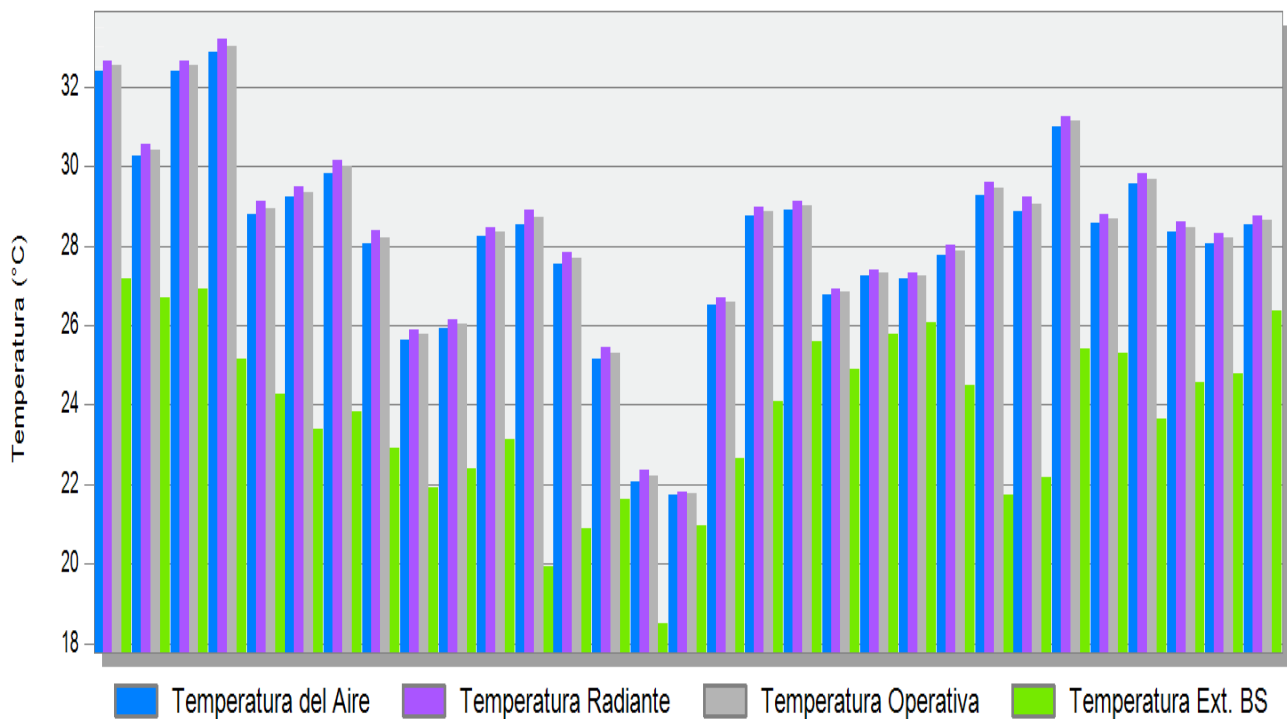


Figura 133. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Villahermosa Tab.

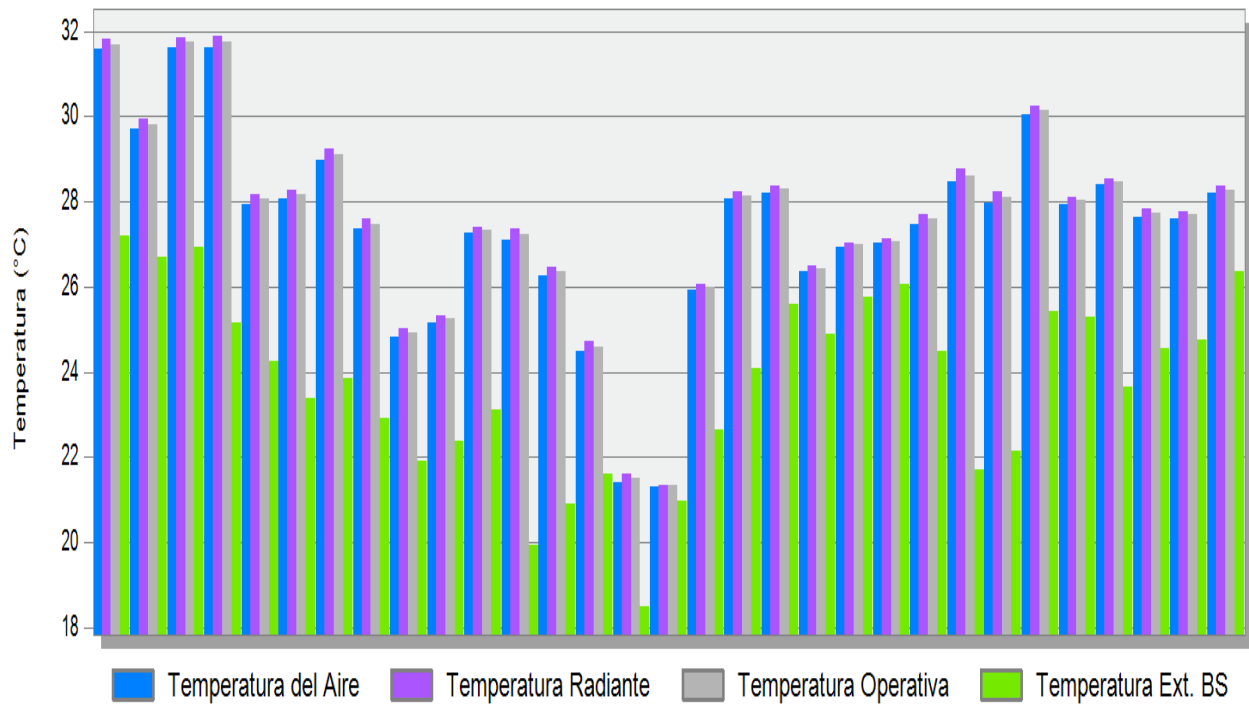


Figura 134. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Villahermosa Tab.

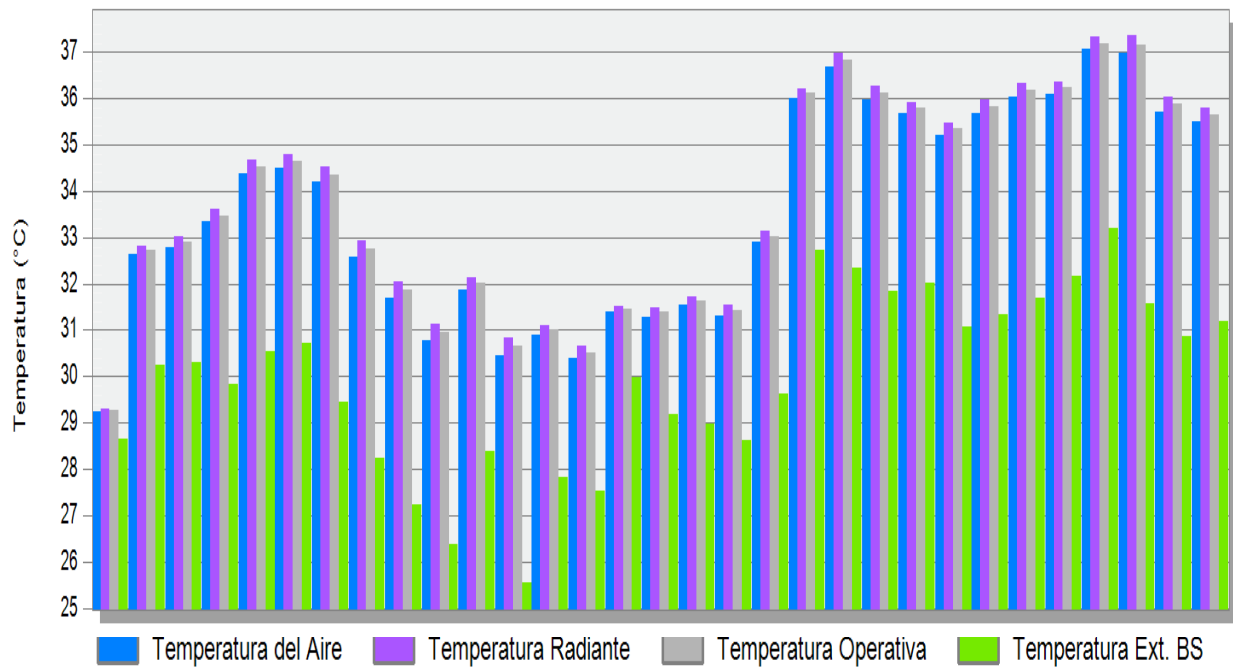


Figura 135. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Villahermosa Tab.

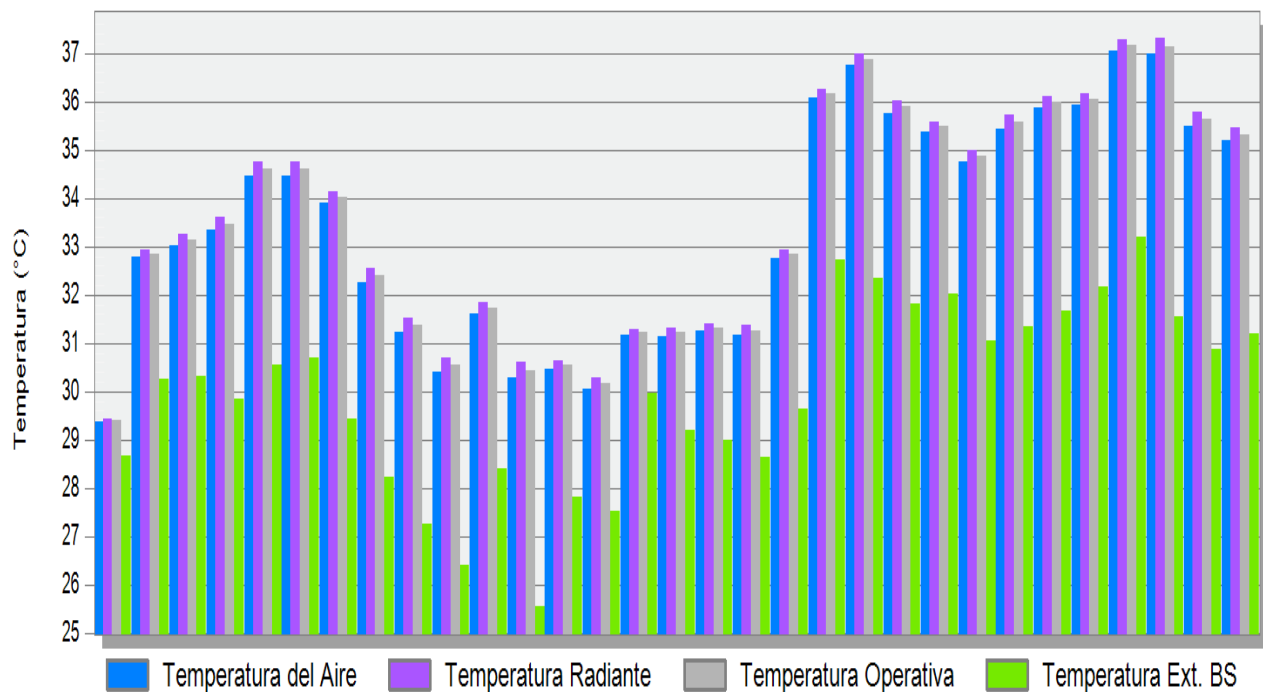


Figura 136. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Villahermosa Tab.

Sin embargo, en el análisis térmico para la temporada representativa de altas temperaturas, (Ver Figuras 135 y 136) ambos prototipos se comportan de manera similar, solo podemos encontrar diferencias de menos de 0.5 °C en el prototipo de TVC por debajo del prototipo de BCC. Como se ha venido mencionando a lo largo de esta investigación, los espesores para ambos sistemas constructivos, tanto el TVC como el de BCC tienen un espesor de 21 cm cada uno, sin embargo, estos espesores no son los convencionales para muros de block de concreto convencional, se optó utilizar el mismo espesor en ambos prototipos con la finalidad de homologar los sistemas y hacerlos similares. Para futuros estudios es nuestra intención realizar los estudios con los espesores que realmente necesita cada uno de los sistemas constructivos, es decir, los muros de BCC quedarían de 15 cm y los muros de TVC quedarían de 35 cm, esto con la finalidad de seguir estudiando ambos sistemas y verificar lo que ocurre en cada uno con sus dimensiones reales.

8.4 OPTIMIZACIÓN DE LOS ESPESORES EN MUROS DE TVC Y BCC

Después de hacer el análisis térmico de los prototipos en Design Builder para las localidades de Aquixtla, Chihuahua y Villahermosa, en donde se respetaron los mismos espesores que se manejaron en los prototipos experimentales reales, se hizo un análisis de los mismos prototipos en los mismos lugares pero ahora se optimizó el espesor de los dos tipos de muros, se consideró un espesor de 15 cm para los muros de BCC y un espesor de 35 cm para los muros de TVC, esto con la finalidad de respetar los espesores que tienen los muros de BCC y TVC en la realidad, para el ejercicio anterior y el experimento real se había considerado unificar el espesor de ambos y utilizar 21 cm para los dos y comparar el comportamiento de los materiales y no atribuir las ventajas o desventajas térmicas de los materiales a los espesores asignados,

sin embargo para efectos de este experimento con herramientas digitales nos podemos dar la oportunidad de experimentar con distintos espesores.

Las Figuras 137 y 138 muestran el comportamiento térmico para la localidad de Aquixtla en enero, (Mes que se está considerando representativo para época de bajo calentamiento). Donde podemos observar que la temperatura interior de los prototipos sigue siendo similar para ambos prototipos, recordemos que el espesor de los muros para BCC es de 15 cm y el espesor de los muros de TVC es de 35 cm. Sin embargo existen ciertas diferencias que se atribuyen principalmente a los distintos retardos térmicos de ambos materiales, (Tierra y Block de concreto convencional). Podemos ver en los primeros días de enero que los días siguientes a un día muy frío, por debajo de los 16 °C presentan temperaturas más altas en prototipo de BCC que en el TVC, esto se debe a que el calor exterior tarda más en pasar hacia el interior en el prototipo de TVC que en del BCC, respondiendo de esta forma a que el amortiguamiento térmico del TVC es mayor que el de BCC.

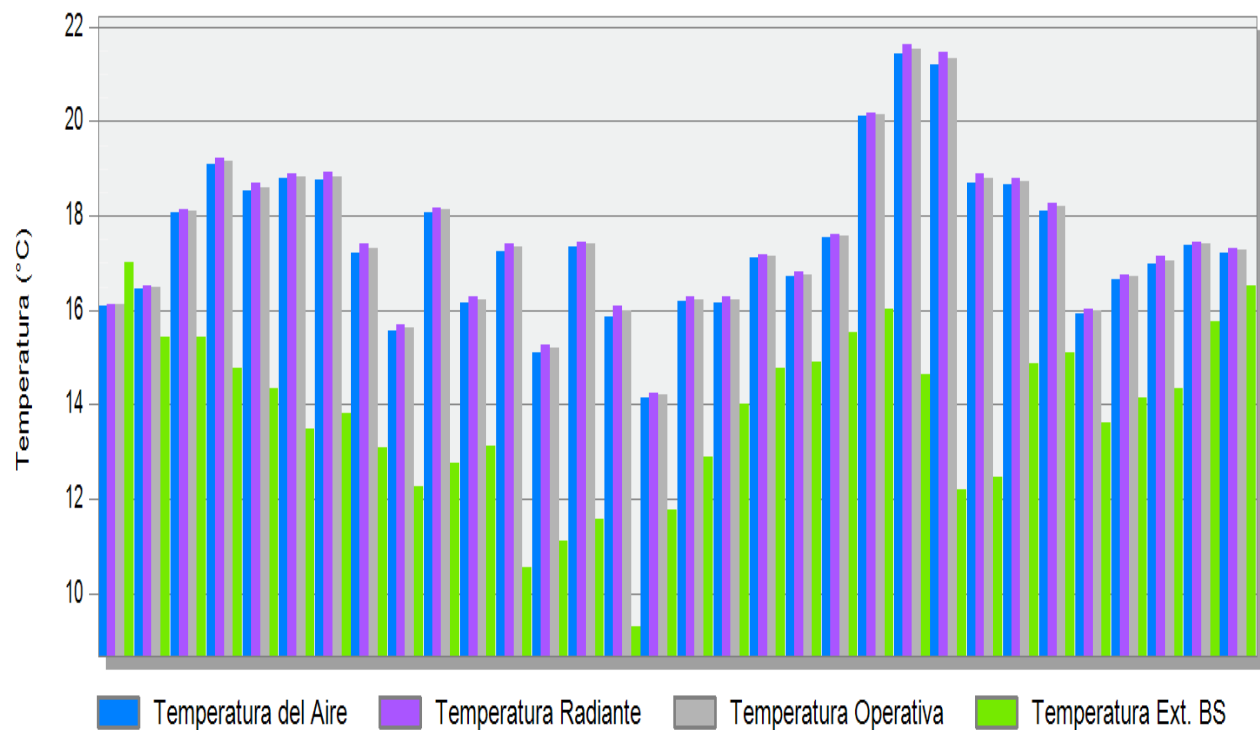


Figura 137. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Aquixtla, Puebla.

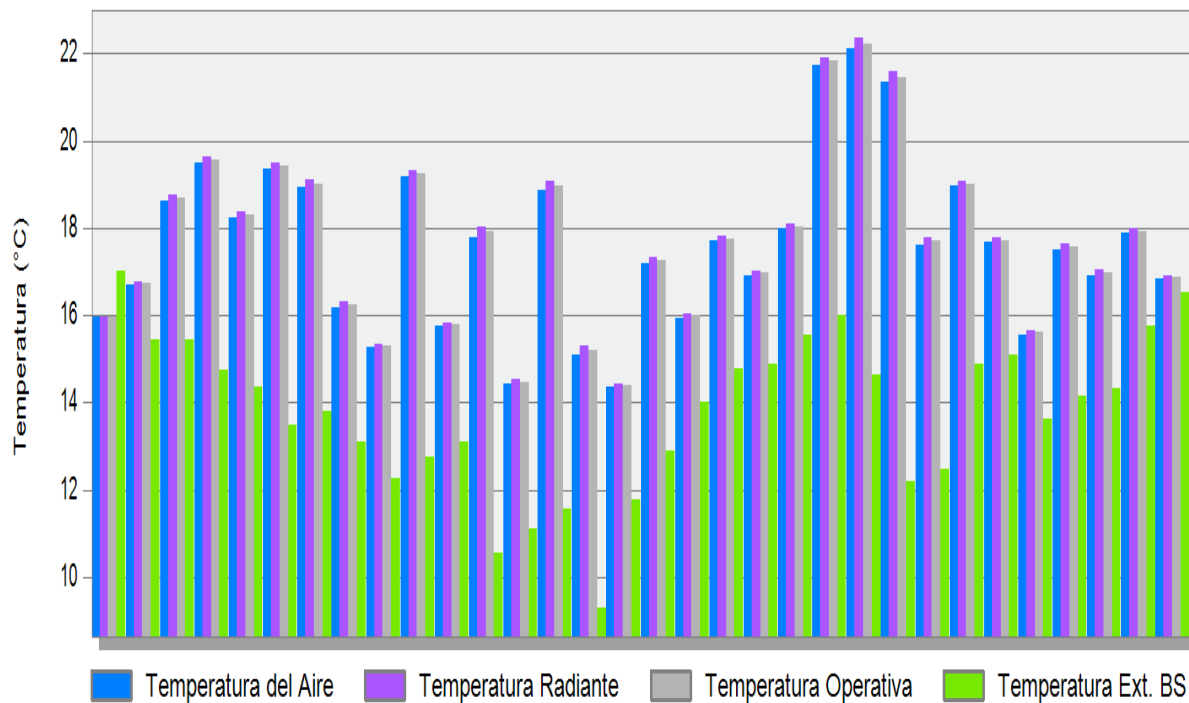


Figura 138. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Aquixtla, Puebla.

Ahora veremos el comportamiento de ambos prototipos para un mes representativo de temporada de sobrecalentamiento, el mes de mayo se ha considerado el mes representativo de sobre calentamiento.

Si observamos las Figuras 139 y 140 podemos deducir nuevamente que el comportamiento térmico de ambos es similar, sin embargo encontramos un fenómeno muy notable a lo largo de todo el mes y de los otros meses que se han analizado hasta el momento, se puede observar que el comportamiento térmico del prototipo de TVC es más estable que el de BCC, es decir; las diferencias de temperatura que se muestran en la Figura 139 tienen menos oscilación térmica que las que se presentan en la Figura 140, las temperaturas en el prototipo de BCC son menos oscilantes debido a que el block de concreto convencional tiene menos retardo térmico que el de TVC.

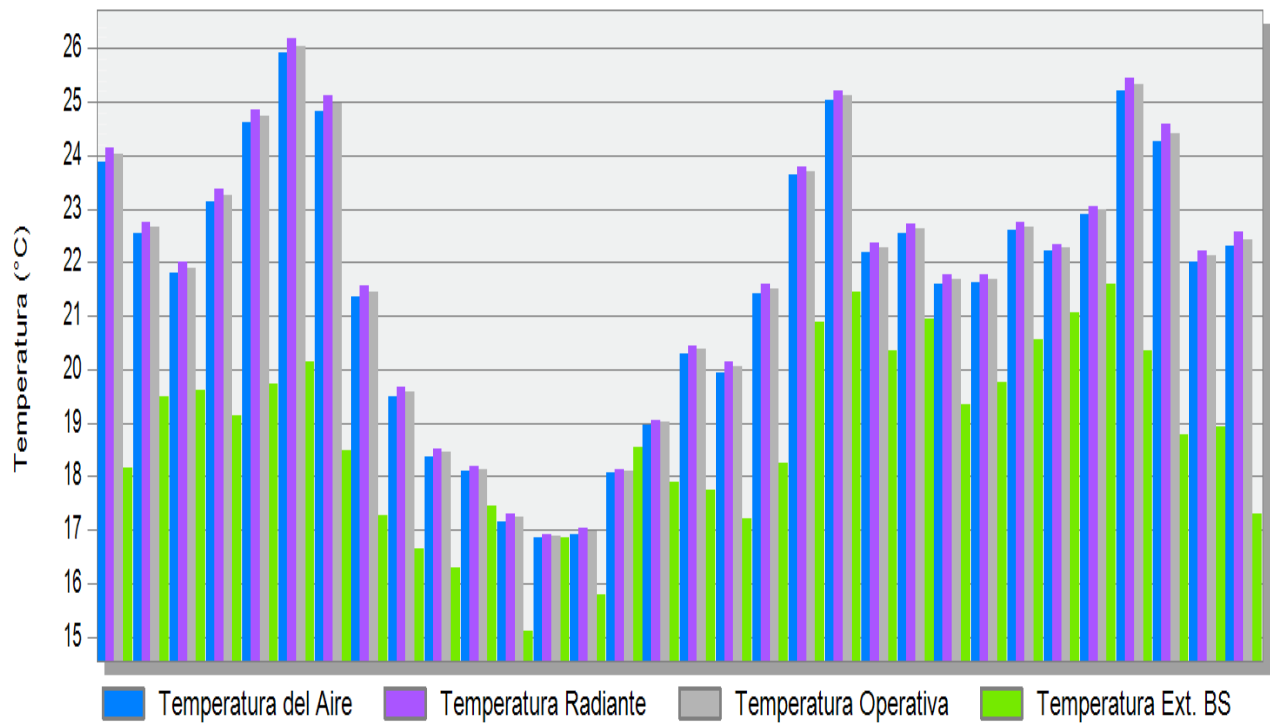


Figura 139. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Aquixtla, Puebla.

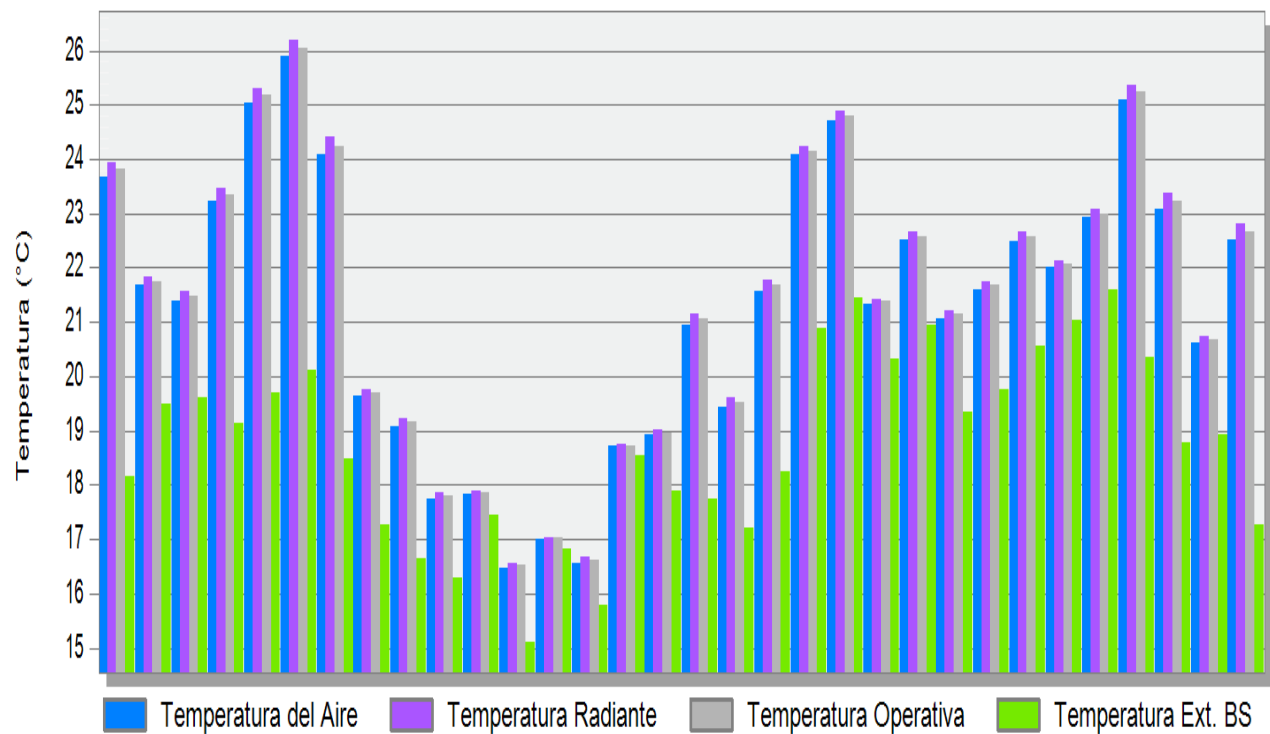


Figura 140. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Aquixtla, Puebla.

El mismo ejercicio se realizó ahora para la ciudad de Chihuahua, en donde se presenta un clima con temperaturas más oscilantes y secas que las que se presentan en Aquixtla, como podemos ver en las Figuras 141 y 142 que el mes de Enero presenta temperaturas exteriores que se acercan a los 0 °C, sin embargo las temperaturas interiores muestran temperaturas de 7°C por encima de la temperatura exterior.

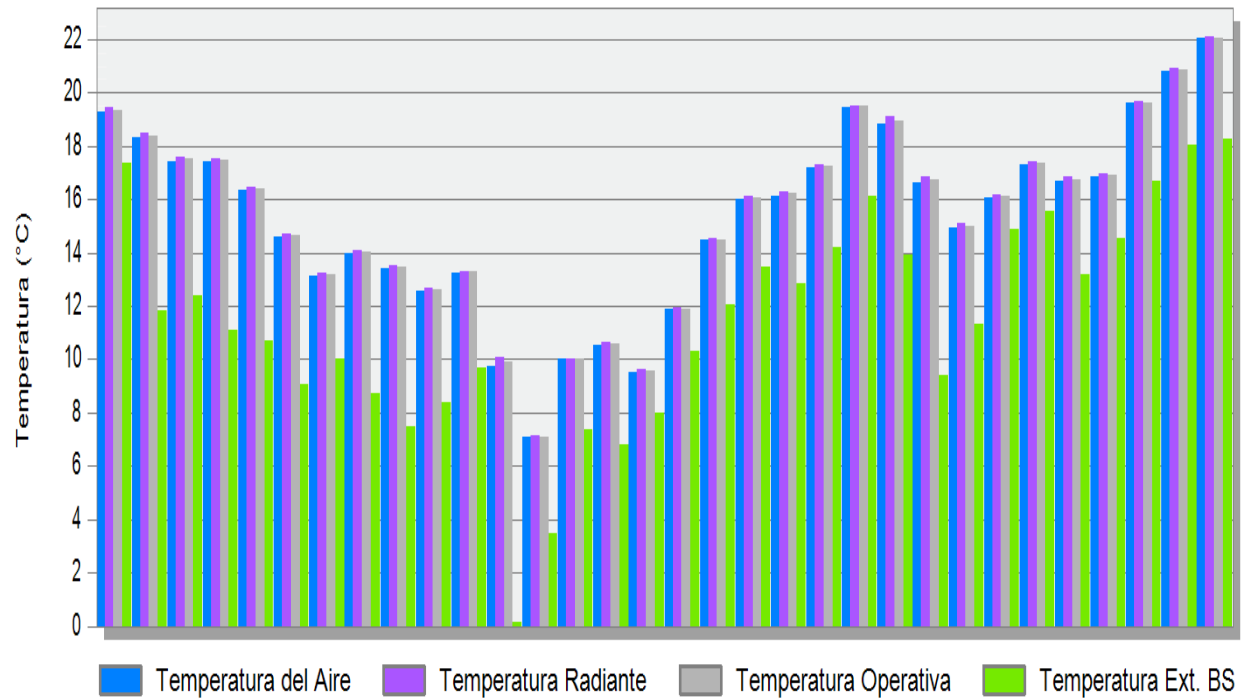


Figura 141. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Chihuahua Chih.

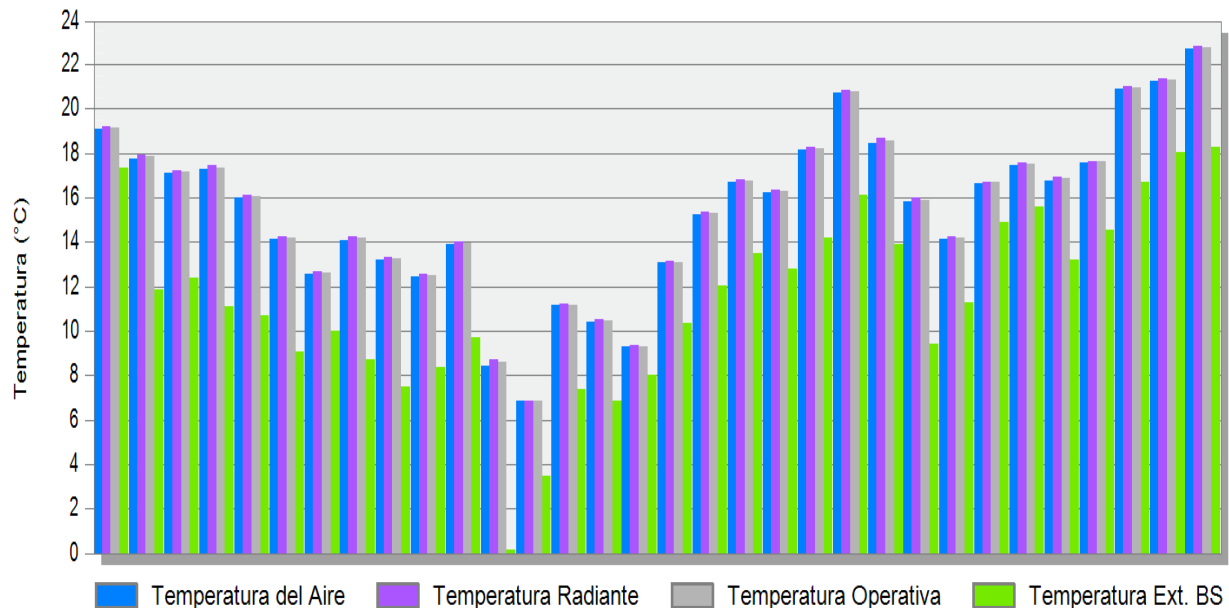


Figura 142. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Chihuahua Chih.

Las Figuras 143 y 144 nos muestran que cuando la temperatura exterior es relativamente baja en la Ciudad de Chihuahua, temperaturas de 20°C, el prototipo de TVC responde de mejor manera presentando temperaturas más altas que las del prototipo de BCC, sin embargo cuando las temperaturas exteriores rebasan los 27 °C las temperaturas para ambos prototipos son relativamente similares, presentando 3 o 4 °C de diferencia el exterior del interior de ambos prototipos.

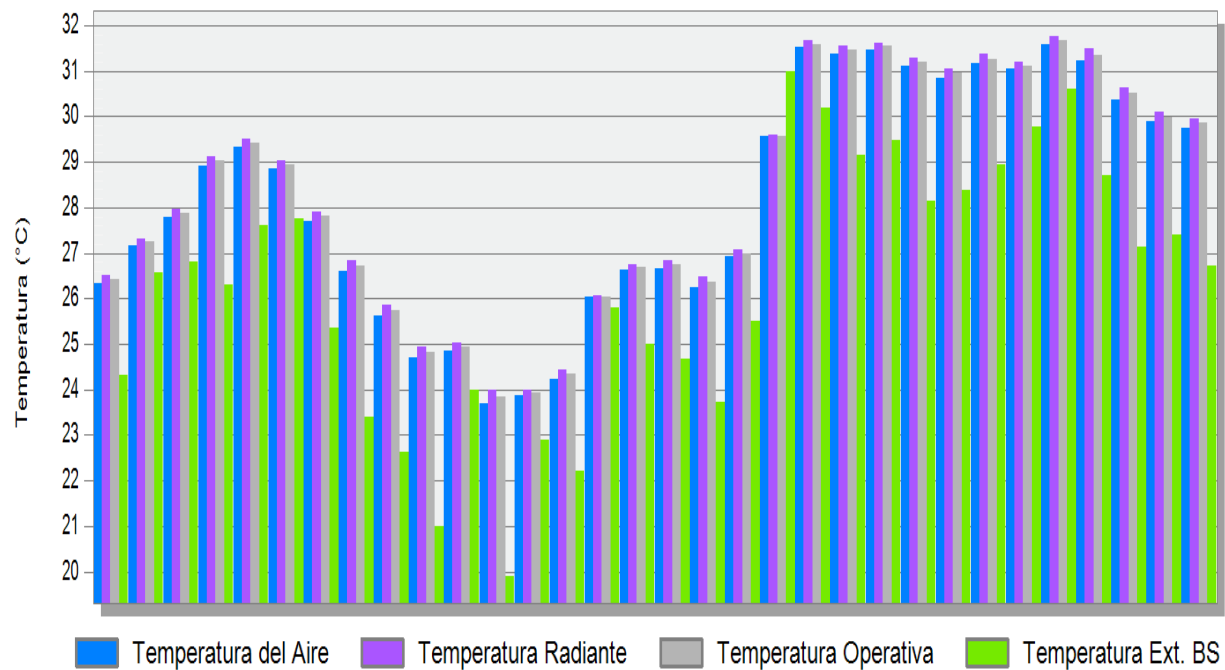


Figura 143. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Chihuahua Chih.

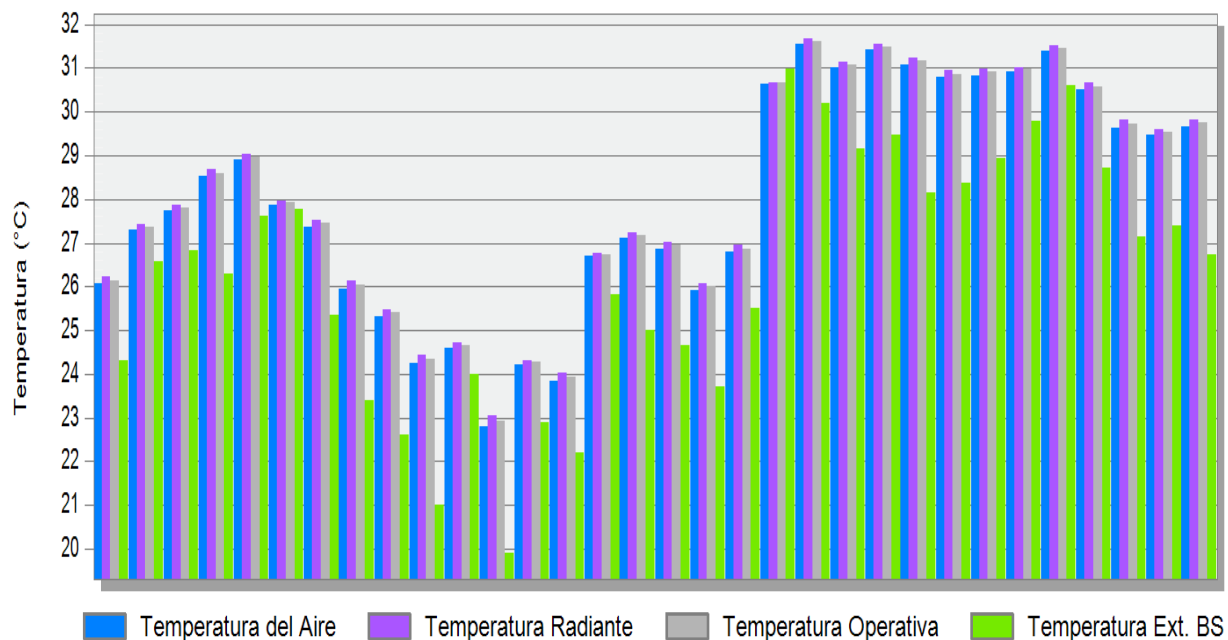


Figura 144. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Chihuahua Chih.

Ahora se presentan las gráficas que se obtuvieron del análisis térmico con Design Builder para la Ciudad de Villahermosa Tabasco, en donde se presenta una temperatura más cálida respecto a los dos lugares anteriores y también así también presenta humedad relativa más alta al estar a solo 24 msnm. Las Figuras 145 y 146 representan el comportamiento térmico del mes de Enero en donde podemos observar similitudes a los fenómenos observados en la Figuras anteriores. Se puede observar en la Figuras 145 y 146 que algunos días del mes de Enero las temperaturas interiores son más bajas en el prototipo de TVC que en el de BCC, aunque son diferencias de 1 o 2°C respectivamente muestran cual es el comportamiento de los diferentes sistemas ante las temperaturas exteriores. Lo mismo pasa para el mes de Mayo, (Mes representativo de sobrecalentamiento), en donde el prototipo de TVC presenta días con menor temperatura interior que el de BCC, (Ver Figuras 147 y 148).

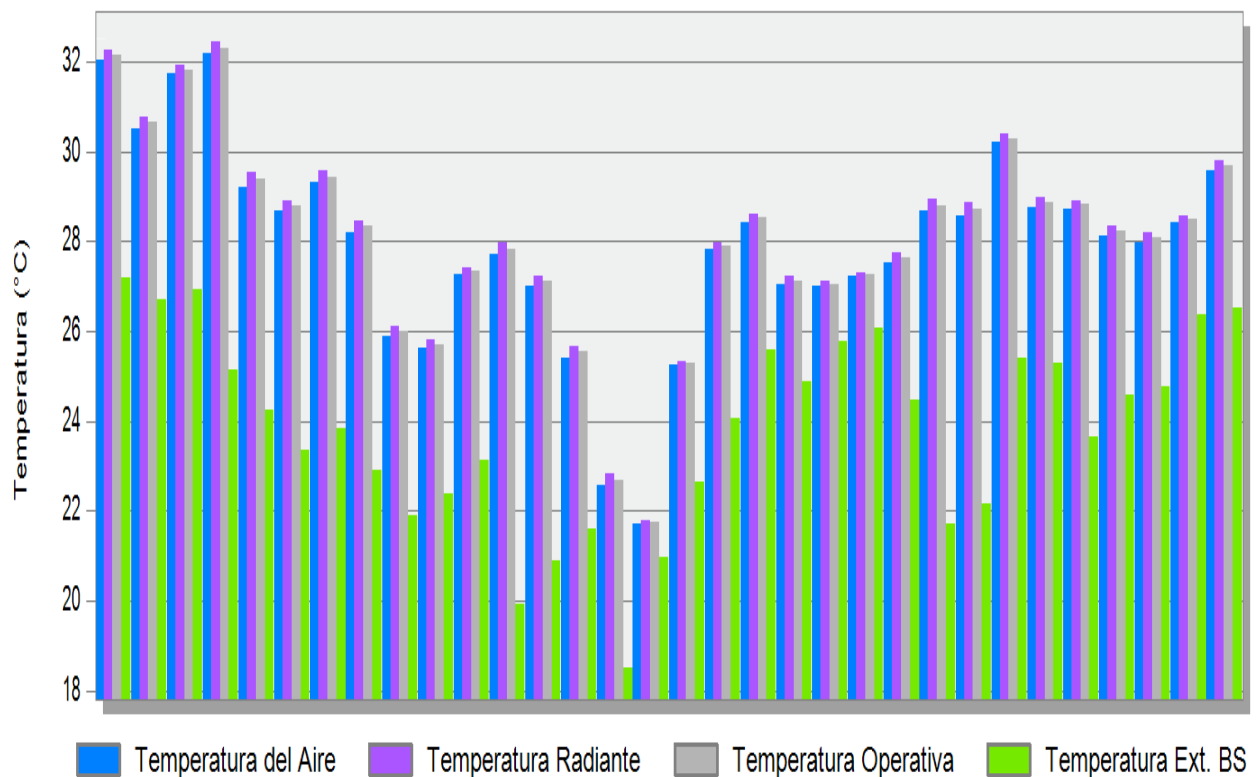


Figura 145. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Enero en Villahermosa Tab.

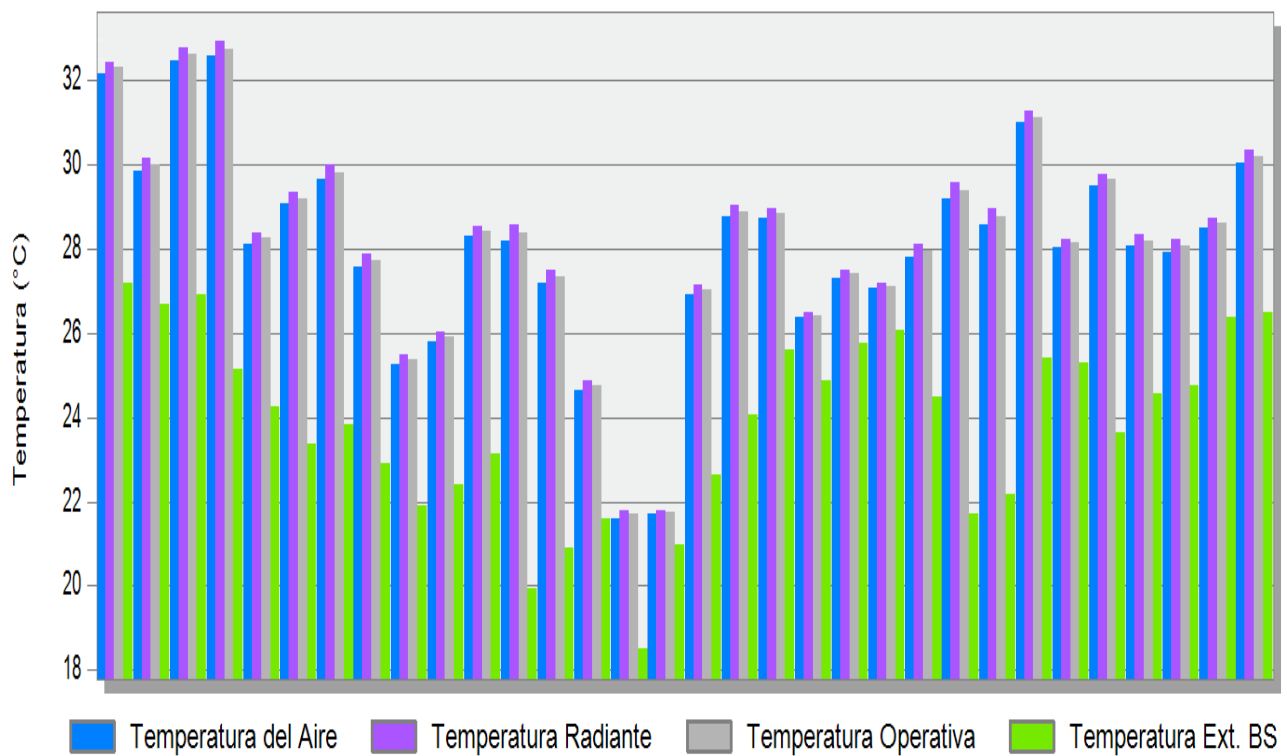


Figura 146. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Enero en Villahermosa Tab.

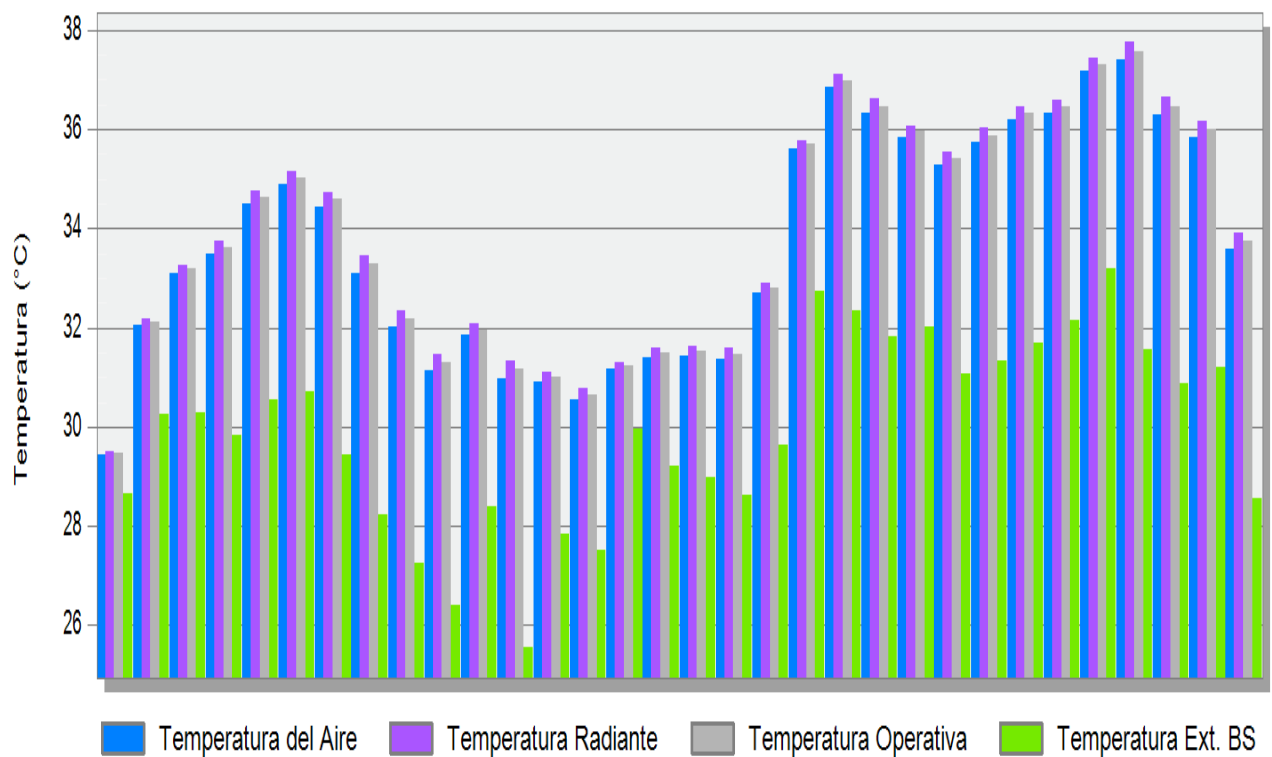


Figura 147. Comportamiento térmico del prototipo de TVC para el mes de Mayo en Villahermosa Tab.

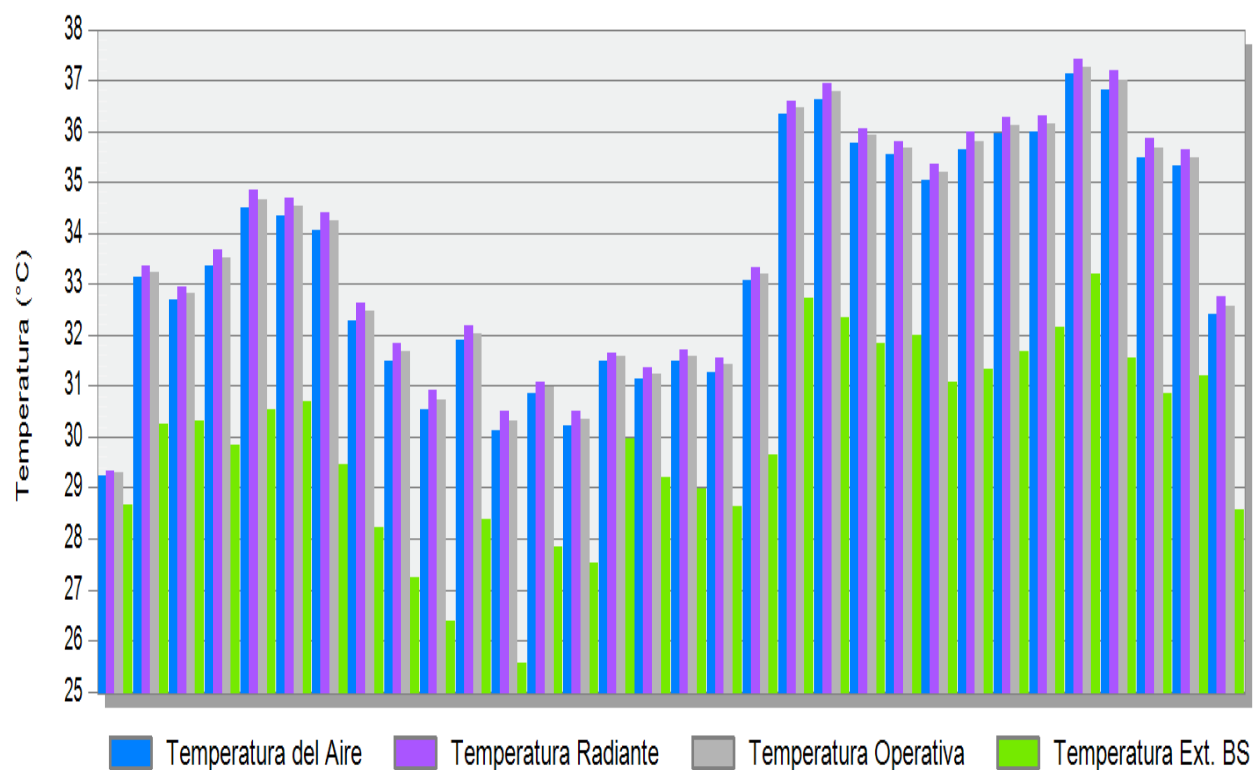


Figura 148. Comportamiento térmico del prototipo de BCC para el mes de Mayo en Villahermosa Tab.

Para concluir este capítulo referente al diseño y análisis de los prototipos con Design Builder se concluyó que las herramientas digitales de análisis termo energético como esta son de gran utilidad cuando se quieren obtener ideas generales de cómo sería el comportamiento térmico de cierto sistema constructivo o material, es una manera certera de aproximación a lo que sería el comportamiento real en un espacio interior que a nosotros como arquitectos nos proporciona una idea clara para optar por la mejor opción a la hora de tomar las decisiones de diseño. Puesto que nosotros hicimos un ejercicio práctico real en donde se construyeron dos prototipos de iguales dimensiones uno con TVC y otro con BCC, pudimos comprobar que los espesores de muros de TVC respecto al de BCC no contribuyen de manera significativa en el comportamiento térmico de los espacios, sin embargo, puesto que los muros de TVC requieren cierta técnica constructiva para poder ser construidos, se estima que en esta parte técnica sobre los muros de TVC hay mucho por hacer y seguir estudiando, se podría trabajar en el análisis de ellos para poder determinar cuál es el espesor ideal que haga un balance entre su comportamiento térmico y su espesor, optimizando de esta manera el sistema constructivo y así poder generar tecnologías que nos ayuden a desarrollar vivienda en masa con muros de TVC.

9 APORTACIONES DEL TRABAJO Y CONCLUSIONES

El esfuerzo y dedicación empleados en el presente trabajo se refleja de manera significativa en el aprendizaje obtenido al final de la investigación. Fue muy grato el haber participado y guiado un ejercicio en donde el tema principal abre diferentes caminos de investigación que posteriormente servirán para ampliar y contribuir en el desarrollo de la construcción con tierra en México. Si bien es sabido que la construcción con tierra en México y en el mundo no es algo nuevo, si es conocido que falta mucho por estudiar respecto al tema, los datos científicos, medidos y comprobados respecto a los beneficios térmicos y constructivos que ofrece la tierra como elemento en la construcción son muy escasos y es necesario apoyar temas de investigación relacionados a los sistemas constructivos alternativos.

Fue muy notoria la empatía y disposición por parte de las personas oriundas con el trabajo realizado, la construcción de los prototipos se hizo posible gracias al apoyo de amigos y familiares que sin duda creen que la construcción con tierra ofrece ciertas ventajas térmicas y así mismo su empleo ayuda a disminuir la emisión de GEI a la atmosfera.

Concluida la etapa de análisis de resultados pudimos concluir varios puntos que favorecen la construcción de tierra cruda:

- ✓ La construcción de vivienda con un sistema de Tierra Vertida Compactada (TVC) es 40% más económica que la construcción de vivienda con un sistema de Block de Concreto Convencional (BCC). Lo que genera una ganancia económica familiar.
- ✓ La construcción de vivienda con TVC es un sistema constructivo en el que podemos ayudar todos, es decir no se necesita personal calificado ni con experiencia en la construcción para poder contribuir en la construcción de muros de TVC.
- ✓ Los muros de TVC son un sistema con cero emisiones de GEI a la atmosfera debido a que la tierra necesaria para su elaboración se toma del mismo sitio en donde se construirá la vivienda.
- ✓ El interior de una vivienda construida con muros de TVC presenta mejores condiciones térmicas que una construida con BCC, debido a que presenta mayor retardo térmico y el amortiguamiento de la temperatura también es mayor.
- ✓ En temporadas de bajo calentamiento, la temperatura radiante de los muros de tierra es mayor que la de BCC.
- ✓ En temporadas de alto calentamiento los muros de TVC aminoran la sensación térmica producida por el calor al exterior de las viviendas.
- ✓ Una vivienda con muros de TVC presenta mejor sensación térmica que una hecha con muros de BCC.
- ✓ Al construir con tierra, estamos reduciendo nuestra huella ecológica y nuestra huella de carbono.

- ✓ Si aprovechamos la textura de la tierra y el color de misma en los muros, podemos crear muros aparentes que serán más agradables a la vista que un muro aparente de BCC.

Un análisis de costos llevado a cabo para ambos prototipos ha demostrado que el sistema de TVC es 40% más barato que el sistema de BCC, esto se debe a que la tierra con la que se hizo fue tomada del mismo lugar de la construcción, por lo tanto, no tenía prácticamente costo alguno, reduciendo consigo el costo de excavación para aplanar el terrero y el transporte de algún material prefabricado como el block, a diferencia del sistema de BCC, donde el costo de cada bloque lleva consigo el costo de fabricación, de almacenamiento, de transporte y la venta de cada pieza. Otros elementos que aumentan el costo del sistema de BCC y lo hacen más caro en comparación con de TVC, son los materiales utilizados para la unión de los bloques, además, el tiempo de construcción del sistema de BCC es más largo.

Es importante tener en cuenta que en este análisis de costo el precio de pintura natural que se aplicó a ambos prototipos era muy bajo y se decidió omitirlo, esto debido a que los materiales utilizados incorporaban cal natural, mucílago de nopal y agua, ampliamente abundantes en la región. Por otra parte, la acción esperada con mejor rendimiento térmico y bajo impacto ambiental del sistema utilizando tierra, lo convierten en una alternativa bioclimática y de construcción sustentable más adecuado (Guerrero, 2014; Hall et al, 2012; Kwok et al, 2014). Además, mediante el uso de la nueva tecnología disponible y materiales optimizados basados en la tierra tratada adecuadamente, los edificios modernos pueden ser construidos con un enfoque más sustentable.

La tierra utilizada para la construcción del prototipo de TVC fue tomada directamente desde el mismo sitio donde fue construido, lo que reduce el impacto ambiental y la huella ecológica en relación con el sistema de BCC. Por otra parte, la tierra es 100% reciclable y el concreto utilizado en los bloques lo es.

A pesar de que las ventajas térmicas del sistema de TVC en comparación con el prototipo de BCC no fueron significativas cuantitativamente, su menor costo y atributos ambientales hacen que sea una alternativa sostenible más adecuada que debemos poner en práctica para que día con día se pueda recuperar esta práctica ancestral que se ha perdido por falta de concientización hacia las nuevas generaciones y falta de amor por la naturaleza y preocupación por las futuras generaciones.

También es importante mencionar que la posición y el grosor de los bloques utilizados en las paredes de prototipo de sistema de BCC no son estandarizados ni utilizados convencionalmente en la vivienda típica de México y se eligieron estas condiciones para tener las mismas dimensiones que el prototipo de TVC en el grosor de los muros. Sería de gran aportación para la arquitectura y el diseño bioclimático, retomar la investigación haciendo una comparativa térmica de dos prototipos en donde se pueda comparar cada uno pero con las dimensiones comunes para cada sistema, es decir, el prototipo de TVC con muros de 30 cm de espesor y el prototipo de BCC con muros de 18 cm de espesor, entonces lo que se estaría comparando no sería el espesor de los muros, sino más bien el sistema constructivo en sí.

Se espera que los resultados de este trabajo de investigación se puedan aplicar en lugares con clima templado o con condiciones climáticas áridas calientes donde se presentan cambios de temperatura más drásticos, y los beneficios y propiedades térmicas de la tierra sean más evidentes y puedan ayudar a mejorar las condiciones interiores de confort de los ocupantes del edificio, así como el medio ambiente, la economía y la calidad de vida de los ocupantes.

10 BIBLIOGRAFIA

1. Agencia Chilena de Eficiencia Energética AChEE. (11 de Marzo de 2013). Obtenido de <http://www.acee.cl/eficiencia-energetica/que-es-ee/>
2. Almeida, M.R., (1998). La literatura gris: sistemas y redes en el ámbito nacional e internacional. Una propuesta para Brasil: Madrid, España, Universidad Complutense de Madrid, tesis doctoral, 263 p.
3. Ando Ashijara, L. (2015). Propiedades termo físicas de los materiales (Presentación de Power Point). México D.F:
4. Barrios G, Huelsz G, Rojas J, Ochoa J M, Marincic I. (2012). Parámetros para medir el desempeño térmico de muros/techos de la envolvente de una edificación que no usa aire acondicionado. Memorias de la XXXVI Reunión Nacional de Energía Solar, ANES, Cuernavaca, Mor. ABC-44, 231-235. Disponible en línea: <http://www.enerhabitat.unam.mx/Cie2/arherramienta.jsp>
5. Barrios, G., Elías, P. Huelsz, G., Rojas, J. (2010). Análisis de indicadores del desempeño térmico de la envolvente de una edificación no climatizada. Memorias de la XXXIV Reunión Nacional de Energía Solar, ANES, Guanajuato, Gto, 2010 ABC– 65, 1-6. Disponible en línea: <http://www.enerhabitat.unam.mx/Cie2/arherramienta.jsp>
6. Bjorn, Kvisgaard. (1997). Thermal Comfort. Denmark. INNOVA air Tech Instruments A/S.
7. Bunge, M. (1966). La ciencia, su método y su filosofía. Buenos Aires: Siglo XXI.
8. Carbon footprint Ltd. (s.f.). Obtenido de www.carbonfootprint.com: <http://www.radsite.co.uk/portfolio.html>
9. Catalina Gutiérrez. "Ecotect: Software de Diseño de Construcción Sustentable" 12 dic 2010.ArchDaily México. Recuperado el 26 Jul 2016, de <http://www.archdaily.mx/mx/02-62481/ecotect-software-de-diseno-de-construccion-sustentable>
10. Cruz Díaz. (2010). El significado de la vivienda vernácula. *Revista Horizontes de Arquitectura*. No.02, 10-16.Recuperado de <http://issuu.com/horizontes18/docs/revista2?e=11995548/7895876>
11. DESIGNBUILDER SOFTWARE LIMITED, (s, f.). Recuperado el 26 de julio, de <http://www.designbuilder.co.uk/about-us>.
12. Doat, P. y. (1996). Construir con tierra. Tomos I y II. Bogotá: CRAterre, Fondo Rotatorio Editorial.
13. ESPASA, C. (1993). Enciclopedia Ilustrada. Madrid ESPASA-CALPE.Gárate, Ignacio. (2002).Artes de la cal. Madrid: Munilla Leria.

14. Estrada, V., Ramírez Cajigal, Almanza Salgado, R. (2005). Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la república Mexicana. México D.F.: Instituto de Ingeniería de la UNAM.
15. Evans, J. M. (2000), Comfort Triangles, Analysis of temperature variations and design strategies in passive architecture, Paper accepted for publication. Proceedings. PLEA 2000. Cambridge.
16. Fernández, Zayas, J., L., & Estrada, Cajigal, V. (1983). Cálculo de la radiación solar instantánea en la República Mexicana. México.; UNAM, Instituto de ingeniería.
17. Fuentes Freixanet, V. (2003). Clima y arquitectura. México D.F.: Nopase.
18. Fuentes Freixanet, V. (2015). Arquitectura bioclimática. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana Azc.
19. Fuentes Freixanet, V.A., & Rodríguez, V.M. (2004). Ventilación natural. Cálculos básicos para arquitectura. México D.F.: Nopase.
20. Gama Castro, J., Solleiro Rebolledo, E., Flores Roman, D., Sedov, S., Cabadaz Báez, H., & Díaz Ortega, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LIX, NÚM. 1, 2007, 133-145.
21. García Chávez, J.R., Fernández, F. (2013). Application of Combined Passive Cooling and Passive Heating Techniques to Achieve Thermal Comfort in a Hot Dry Climate. Elsevier 2013 ISES Solar World Congress Energy Procedia.
22. García Chávez, J.R., Fernández, F. (2015). Using passive heating and cooling strategies to improve thermal comfort and reduce energy consumption in hot arid regions. CISBAT 2015 Lausanne Switzerland
23. Garzón, B. (2007) Arquitectura Bioclimática. Buenos aires: Nobuko.
24. Gernot, M. (2005), Manual de construcción para viviendas antisísmicas con tierra. Alemania: Laboratorio de Investigación para la Construcción Experimental de la Universidad de Kassel.
25. Gernot, M. (2005). Manual de construcción para viviendas antisísmicas con tierra. Alemania: Laboratorio de Investigación para la construcción experimental de la Universidad de Kassel.
26. Gernot, M. (2006). Building with earth. Switzerland: Basel.
27. Gernot, M. (2010), Manual de construcción con tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. España: Eco Habitar.
28. Givoni, B. (1976), Man. Climate and Comfort, Elsevier, London.
29. González Cruz, E. (2003). Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática. *Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD). Venezuela. Universidad de Zulia.*

30. Granados Menéndez, H. (2010). Restauración y rehabilitación, rehabilitación energética de los edificios. Madrid: Tornapunta.
31. Granados, Menéndez, H. (2012). Rehabilitación energética de edificios. Madrid.: Tornapunta ediciones, S.L.U.
32. Guerrero Baca, L. (2014). Reutilización del patrimonio edificado en adobe. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.
33. Guerrero, L., Javier Soria, F., García, J., & Fernández, F. (2015). Comportamiento Térmico de un Módulo experimental Construido con Tierra Vertida Compactada en la Ciudad de México. Euro elects 2015, 751-758.
34. Guerrero, L., Soria, F.J., García, J.R., & Fernández, F. (2015). Comportamiento térmico de un Módulo Experimental Construido con Tierra Vertida Compactada en la Ciudad de México. Proceedings of EURO ELECS 2015.
35. Hewitt Paul, G. (2009). Conceptos de Física. México.: Limusa.
36. Holman, J. (1999). Transferencia de Calor. 10th ed. México: Compañía editorial continental, S.A. de C.V.
37. Houben, H., & Doat, P. (1982). "Construir en tierra". En: Tecnología de construcción en tierra sin cocer (pp.47-57). México: CONESCAL.<http://horizontes18.com/wordpress/wp-content/uploads/2015/05/img05364.pdf>
38. Huelisz G., Rechtman R., Rojas J. (2009). Altos valores de la resistencia térmica no aseguran un buen desempeño térmico de la envolvente de una edificación. Memorias de la XXXIII Reunión Nacional de Energía Solar, ANES, Cuernavaca, Mor. ABC-050, 237-240. Disponible en línea: <http://www.enerhabitat.unam.mx/Cie2/arherramienta.jsp>
39. Jurado, Y. (2005). Técnicas de investigación documental. México D.F.: Thomson.
40. López Morales, Francisco J. (1987). Arquitectura vernácula en México. México D.F.: Trillas.
41. Manuel Rodríguez y otros. (2002). Introducción a la arquitectura bioclimática. México D.F.: LIMUSA, UAM Azcapotzalco.
42. Matoses Ortells, I., & Hidalgo Mora, J. (2013). Consecuencias de intervenciones erróneas en la arquitectura de tapia. Construcción con tierra. Patrimonio y vivienda. X CIATTI. Congreso de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos, 217-224. Obtenido de <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones.html>
43. McHenry, P. (1996). Adobe, Cómo construir fácilmente. . México D.F.: Trillas.

44. Monjo Carrió, J. (2014). La construcción publicada: España, 1851-1950. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
45. Neves C., Borges F. (2011) Técnicas de construcción con tierra. Brasil. FEB-UNESP / PROTERRA. Recuperado de <http://whc.unesco.org/en/list/366/>
46. Neves, C., Faria, O, B. (2011). Técnicas de construcción con tierra. Buenos Aires Argentina.: Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA.79p. Disponible en <http://www.redproterra.org>>. Acceso en 30/05/2016.
47. Olgyay, V. (1998). Design with climate, bioclimatic approach to architectural regionalism. Barcelona: Gustavo Gilli, S L.
48. P.O.Fanger. (1972). Thermal confort. New York. Mc Graw Hill
49. Prieto, V. (1994) Vivienda campesina en México. México D.F.: Beatrice Trueblood.
50. Rapoport, A. (1972). House Form and Culture. Milwaukee: University of Wisconsin.
51. Rodríguez, J. (2016). Introducción a la termodinámica. Universidad Tecnológica Nacional.
52. Rodríguez, M. (2002). Introducción a la arquitectura bioclimática. México D.F.: LIMUSA, UAM Azcapotzalco.
53. Rodríguez, Manuel y otros. (2002). Introducción a la arquitectura bioclimática. México: LIMUSA, UAM Azcapotzalco.
54. Sánchez Cruz, P.A. (2015). Recubrimientos y acabados con tierra para vivienda del medio rural, eficiencia y sustentabilidad. *Revista Horizontes de Arquitectura*. Recuperado de http://horizontes18.com/wordpress/wp-content/uploads/2014/04/corregidoTc-S%C3%A1nchez_autor.pdf
55. Sánchez Cruz, P.A. (Junio 2015). La sostenibilidad de la arquitectura tradicional. *Revista Horizontes de Arquitectura*. No.94, 22-23. Recuperado de
56. Sánchez Cruz, P.A. (Marzo 2015). Valores tangibles e intangibles de arquitectura vernácula. *Revista Horizontes de Arquitectura*. No.93, 26-27. Recuperado de http://horizontes18.com/wordpress/wp-content/uploads/2014/04/corregidoTc-S%C3%A1nchez_autor.pdf
57. Sears Francis, W., Zemansky Mark, W., Young Hugh, D., & Freedman Roger, A. (2004). Física Universitaria Vol.1. 11a ed. México: Pearson Educación.
58. SEDESOL (2013). Reglas de Operación del Programa para el Desarrollo de Zonas Prioritarias (PDZP), para el ejercicio fiscal 2014, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28/12/2013. Disponible en: http://www.microrregiones.gob.mx/documentos/2014/RO_PDZP2014_DO.pdf

59. Serway R., Vuille C. (2013). Fundamento de Física. 9ª ed. México: Cengage Learning Editores S.A. de C.V.
60. SOL-ARQ. (04 de Noviembre de 2010). Recuperado el 04 de Enero de 2016, de <http://www.sol-arq.com/index.php/factores-ambientales/temperatura>
61. Sol-Arq.: Soluciones arquitectónicas sustentables, (s, f.). Recuperado el 26 de julio, de <http://www.sol-arq.com/index.php/factores-ambientales/temperatura>
62. Sostenibilidad para todos. (s.f.). Recuperado el 20 de julio de 2016, de <http://www.sostenibilidad.com/que-es-y-como-funciona-la-biomasa>
63. Szokolay, S. V. (1984). Passive and low energy design for thermal and visual comfort.PLEA'84 México. Vol 1 Pergamon Press. New York.
64. Szokolay, Steven V. (2004). Introduction to Architectural Science. The basis of Sustainable Design. London. UK.: Architectural Press, Elsevier.
65. Tejada, U. (2001). Buena tierra. Apuntes para el diseño y construcción con adobe. Lima: CIDAP.
66. Tudela, Fernando. (1982). Eco diseño. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.
67. Vieira Hoffmann, M., Negrini Minto, C., & Falleiros Heise, A. (2011). Tapia. (Técnicas de construcción con tierra. Bauru: Febunesp/proterra.

11 FUENTES DIGITALES CONSULTADAS

<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n20/amvaz.html>

<http://smn.cna.gob.mx/es/>

<http://www.ada-c.com/es/conversor-co2.html>

<http://www.designbuilder.com/>

<http://www.directindustry.es/>

<http://www.enerhabitat.unam.mx/Cie2/>

<http://www.gob.mx/conagua>

<http://www.inegi.org.mx/>

<http://www.selba.org/GEDSEsp/Ecologica/Energia/HuellaFuentesEnergia.html>

<http://www.sol-arq.com/>

<http://www.tme.eu/es/>

<https://ashrae.org/>

<https://www.google.com.mx/maps>

www.iingen.unam.mx/

12 REFERENCIAS

- Agencia Chilena de Eficiencia Energética AChEE. (11 de Marzo de 2013). Obtenido de <http://www.acee.cl/eficiencia-energetica/que-es-ee/>
- Almeida M.R. (1998). *La literatura gris: sistemas y redes en el ambito nacional e internacional. Una propuesta para Brasil*. Madrid España : Universidad Complutense de Madrid. Tesis doctoral.
- Ando Ashijara, L. (2015). Propiedades termofísicas de los materiales (Presentación de Power Point). México D.F.:
- Bunge, M. (1966). *La ciencia, su método y su filosofía*. Buenos Aires: Siglo XXI.
- Díaz, C. (2010). El significado de la vivienda vernácula. *Horizontes de arquitectura*(2), 10-16. Recuperado el 14 de enero de 2016, de <http://issuu.com/horizontes18/docs/revista2?e=11995548/7895876>
- Doat, P. y. (1996). *Construir con tierra. Tomos I y II* . Bogotá: CRAterre, Fondo Rotatorio Editorial.
- ESPASA, C. (1993). *Enciclopedia Ilustrada. Madrid ESPASA-CALPE. Gárate, Ignacio.(2002). Artes de la cal*. Madrid : Munilla Leria .
- Gama Castro, J., Solleiro Rebolledo, E., Flores Roman, D., Sedov, S., Cabadaz Báez, H., & Díaz Ortega, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LIX, NÚM. 1, 2007*, 133-145.
- García Chávez, J.R., Fernández, F. (2013). Application of Combined Passive Cooling and Passive Heating Techniques to Achieve Thermal Comfort in a Hot Dry Climate. Elsevier 2013 ISES Solar World Congress Energy Procedia.
- García Chávez, J.R., Fernández, F. (2015). Using passive heating and cooling strategies to improve thermal comfort and reduce energy consumption in hot arid regions. CISBAT 2015 Lausanne Switzerland
- Gernot, M. (2005). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas con tierra*. Alemania: Laboratorio de Investigación para la construcción experimental de la Universidad de Kassel.
- Guerrero Baca, L. (2014). *Reutilización del patrimonio edificado en adobe*. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Guerrero Baca, L. F. (2014). *Reutilización del patrimonio edificado en adobe*. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.

- Houben, H., & Doat, P. (1982). *"Construir en tierra".En: Tecnología de construcción en tierra sin cocer (pp.47-57)*. México: CONESCAL.
- Manuel Rodríguez y otros. (2002). *Introducción a la arquitectura bioclimática*. México D.F.: LIMUSA, UAM Azcapotzalco.
- McHenry, P. (1996). *Adobe, Cómo construir fácilmente*. . México D.F.: Trillas.
- Monjo Carrió, J. (2014). *La construcción publicada:España, 1851-1950*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas .
- Rapoport, A. (1972). *House Form and Culture*. Milwaukee: University of Wisconsin.
- Rodriguez , M. (2002). *Introducción a la arquitectura bioclimática* . México D.F.: LIMUSA, UAM Azcapotzalco.
- Rodríguez, Jorge A. (2016). *Introducción a la termodinámica*. Universidad Tecnológica Nacional.
- Sears Francis, W., Zemansky Mark, W., Young Hugh, D., & Freedman Roger, A. (2004). *Física Universitaria Vol.1. 11a ed*. México: Pearson Educación.
- SEDESOL. (2013). *Reglas de Operación del Programa para el Desarrollo de Zonas Prioritarias (PDZP), para el ejercicio fiscal 2014, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28/12/2013*.
Obtenido de http://www.microrregiones.gob.mx/documentos/2014/RO_PDZP2014_DOI.pdf
- SOL-ARQ. (04 de Noviembre de 2010). Recuperado el 04 de Enero de 2016, de <http://www.sol-arq.com/index.php/factores-ambientales/temperatura>
- Sostenibilidad para todos*. (s.f.). Recuperado el 20 de julio de 2016, de <http://www.sostenibilidad.com/que-es-y-como funciona la biomasa>
- Szocolay, S. V. (1984). *Passive and low energy design for thermal and visual comfort.PLEA'84 México. Vol 1 Pergamon Press*. New York.
- Tejada, U. (2001). *Buena tierra. Apuntes para el diseño y construcción con adobe*. Lima : CIDAP.
- Tudela, Fernando. (1982). *Ecodiseño*. Mexico D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Vieira Hoffmann, M., Negrini Minto, C., & Falleiros Heise, A. (2011). *Tapia. (Técnicas de construcción con tierra*. Bauru : Febunesp/proterra.

13 CURRICULUM VITAE

Arq. Gabriel Morales Galaviz

Información personal

- **Nacionalidad:** Mexicana
- **Edad:** 26 años
- **Fecha de nacimiento:** 28 - mayo – 1990
- **Estado civil:** Soltero
- **Teléfono:** 55 23 70 04 97
- **Email:** gabriel_gala12@hotmail.com



Estudios realizados

- **Universitarios:** Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco
Título obtenido: Licenciado en Arquitectura
Cédula profesional: 8045090
Periodo: 2008-2012
- **Posgrado:** Especialidad en Diseño Bioclimático en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco
Título obtenido: Especialista en Diseño Bioclimático
Periodo: 2014-2015
Maestría en Diseño Bioclimático en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco
Título obtenido: Maestro en Diseño Bioclimático
Periodo: 2015-2016

Seminarios y cursos

- 2º Foro Internacional de desarrollo sustentable en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco- Noviembre 2015
- 1er Seminario de arquitectura y diseño “Plan B” en el Tecnológico de Monterrey Campus Puebla Enero 2015
- 7º Seminario de Urbanismo Internacional en el Museo Franz Mayer, México D.F. 2012
- 1er Foro internacional de Propuestas Urbanas en la Universidad de Simón Bolívar en Barranquilla Colombia. 2012
- 6º Seminario de Urbanismo Internacional en el Museo Franz Mayer, México D.F. 2011

- Curso de fotografía para arquitectura en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco 2011
- Curso: Diseño y construcción de muros verdes y azoteas verdes impartido por la empresa OJ-TAG en Cholula Puebla.2010
- Curso: Arquitectura con bambú impartido por la empresa OJ-TAG en Cholula Puebla.2010

Idiomas

- Español e Ingles

Experiencia profesional

- ARCBIO CONSTRUCCIÓN S.A. de C.V.
Cargo: Diseñador de proyectos bioclimáticos
2015- Actualidad.
- MOBILIARIO Y DISEÑO DE IDEAS S.A. de C.V.
Cargo: Diseñador de proyectos arquitectónicos y de interiores, diseño de mobiliario
2012- 2014
- GRUPO INDUSTRIAL FERRETI
Cargo: Dibujante de proyectos arquitectónicos
2011- 2012